



**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI
CERCĂRII ȘTIINȚIFICE
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**

**CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂȚĂȚIREA MODELELOR
NUMERICE DE SIMULARE A INECȚIEI DE APĂ**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,

Prof. univ. dr. ing. IULIAN NISTOR

DOCTORAND,

ing. BADEA ANA-MARIA

PLOIEȘTI

-2016-

Cuprins

Introducere	3
Contributions to the improvement of water injection numerical simulation models.....	5
1. Fundamentele injecției de apă.....	6
2. Metode analitice de proiectarea exploatării zăcămintelor de țiței prin injecția de apă.....	9
2.1. Injecția intraconturală.....	9
2.1.1. Comportarea până în momentul interferenței dintre două sonde de injecție alăturate	10
2.1.2. Comportarea între interferența și încheierea dezlocuirii gazelor.....	10
2.1.3. Comportarea între momentul încheierii dezlocuirii gazelor și pătrunderea apei în sondele de țiței	11
2.1.4. Comportarea după pătrundere	11
2.2. Injecția extraconturală a apei în zăcământ	11
2.2.1. Proiectarea procesului de injecție	11
2.2.2. Prevederea comportării în exploatare	12
2.3. Alte metode de proiectare a exploatării zăcămintelor de țiței prin injecția de apă	13
2.3.1. Modelul Dykstra-Parsons	13
2.3.2. Modelul Craig-Geffen-Morse.....	15
2.3.3. Modelul Stiles.....	17
3. Cercetări privind aplicarea modelelor analitice, respectiv numerice, în cazul unor procese de injecție de apă, în șantierelor de petrol. Studii de caz	19
3.1. Injecția intraconturală. Studiu de caz	19
3.1.1. Comportarea până în momentul interferenței dintre două sonde de injecție alăturate	22
3.1.2. Comportarea între momentul încheierii dezlocuirii gazelor și pătrunderea apei în sondele de țiței	22
3.1.3. Comportarea după pătrundere	23
3.2 . Injecția extraconturală. Studiu de caz	25
3.2.1. Proiectarea procesului de injecție	26

3.2.2. Prevederea comportării în exploatare	26
3.3. Modelul Dykstra-Parsons. Studiu de caz	27
3.4. Modelul Craig-Geffen-Morse. Studiu de caz.....	28
3.5. Modelul Stiles. Studiu de caz.....	28
3.6. Modelarea numerică a injectiei de apă folosind simulatorul ECLIPSE	29
3.6.1. Modelarea numerică a exploatării zăcămintelor de hidrocarburi fluide.....	29
3.6.2. Pachete de programe specializate	30
3.6.3. Rezultatele simulării	31
a) Injectia intraconturală	31
b) Injectia extraconturală	35
Concluzii și contribuții personale	38
Bibliografie	41

Introducere

Injectia de apă s-a aplicat pentru prima data cu peste 100 ani în urmă în Bratford Pennsylvania.

În anul 1888 J. Carll a raportat faptul că injectia de apă pare să crească recuperarea finală a țițeiului. Pentru început s-a folosit metoda numită injectie circulară. Aceasta constă în pornirea la început a injectiei într-o singură sondă. Apa se va deplasa radial în zăcământ și va inunda sondele adiacente, care la rândul lor se vor transforma în sonde de injectie.

După 1950, una dintre cele mai răspândite metode de creștere a factorului de recuperare și de intensificare a exploatării zăcămintelor o constituie injectia de apă [1].

În prezent, injectia de apă este privită ca o metodă de recuperare eficientă și economică.

În Romania primul proces de injectie de apă s-a efectuat în zăcământul Boldesti-Sarmațian în anul 1953.

Factorul de recuperare al țițeiului într-un proces de injectie de apă, trebuie să ia în considerare atât eficiența macroscopică cât și cea microscopică a procesului, care este dată de factorul de spălare. Este evident că factorul de spălare este dat astfel de produsul dintre factorul de inundare și cel de spălare. Din păcate nu există nici un model teoretic care să descrie acest proces în toata complexitatea lui, ci numai în cazuri simplificate.

Injectia de apă într-un zăcământ crește energia zăcământului și împinge țițeiul către sondele de producție. Este metoda de recuperare secundară cea mai des folosită.

Injectia de apă a fost și este aplicată atât ca metodă de recuperare secundară, cât și ca metodă primară. Aceasta poate fi aplicată, atât în perioada de început a exploatării, menținându-se presiunea deasupra presiunii de saturație, cât și mai târziu, după ce presiunea de zăcământ a scăzut sub presiunea de saturație. Cea din urmă este mai utilizată în SUA.

Teza de doctorat este structurată în trei capitole, urmată de o listă cu principalele concluzii desprinse în timpul cercetărilor aferente aplicării injectiei de apă, precum și o serie de anexe care conțin diverse diagrame, la care se adaugă variațiile parametrilor determinați cu simulatorul ECLIPSE, alături de datele și rezultatele simulării, codul sursă al programelor în Visual Studio : C ++, listate sau conținute într-un DVD.

Capitolul unu este consacrat fundamentelor injectiei de apă.

În capitolul doi sunt fundamentate detaliile privind metodele analitice de proiectare a zăcămintelor de țiței prin injectia de apă.

Capitolul trei este destinat aplicării modelelor analitice, respectiv numerice, în cazul unor procese de injecție de apă, în șantierele de petrol, studii de caz.

Principalele contribuții cu caracter personal se pot sintetiza astfel:

- prezentarea sistematică a metodelor analitice a injecției de apă.
- realizarea unor studii de caz privind estimarea factorului de recuperare al țițeiului din zăcământ prin injecție de apă, folosind diferite metode analitice, atât pentru injecția intraconturală, cât și pentru cea extraconturală.
- prezentarea sistematică a procedurilor de calculare al factorului de recuperare.
- elaborarea unei schemei logice pentru programul care calculează permeabilitățile relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata).
- elaborareaa unui program în Visual Studio: C++ pentru calcularea permeabilităților relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata), care oferă posibilitatea utilizării calculatorului pentru determinarea acestor parametrii. În anexele 1, 2, 3 este redat codul sursă al programului denumit FRAPA. Programul prezentat în lucrare folosește date ușor accesibile, având în vedere un grad de exactitate ridicat, pentru o gamă variată de zăcăminte.
- stabilirea posibilității de estimare a performanței unui proces de recuperare a țițeiului din zăcământ prin aplicarea injecției de apă, cu particularizarea la condițiile specifice.
- perfectarea unui studiu de caz pentru injecția intraconturală, prin modelare numerică cu ajutorul simulatorului ECLIPSE.
- realizarea unui studiu de caz pentru injecția extraconturală, prin modelare numerică cu ajutorul simulatorului ECLIPSE.
- teza de doctorat **“Contribuții la îmbunătățirea modelelor numerice de simulare a injecției de apă”**, a scos în evidență posibilitatea măririi factorului de recuperare prin injecție de apă.

Autoarea dorește îi să mulțumească conducătorului științific al tezei, domnului prof. univ. dr. ing. IULIAN NISTOR, pentru sprijinul, încrederea, sugestiile și îndrumarea acordată pe parcursul elaborării tezei.

Contributions to the improvement of water injection numerical simulation models

Injecting water into a deposit augments its energetic yield and pushes the crude oil toward the wells. This is the most used secondary recovery method.

The water injection process increases the quantity of crude oil recovered from the deposit by:

- Maintaining the deposit's internal pressure
- Displacing (washing) the crude oil with water.

In the beginning, water injection was done by accident, however, after 1950, it became one of the most widely used methods of increasing the recovery factor.

Today, water injection is widely regarded as being an efficient and cost saving recovery method.

This thesis analyses the recovery factor in the case of water injection (both internally and externally), identifying the ways of screening for it.

The PhD is structured in three chapters, followed by a list of main conclusions and personal contributions deduced from related research in water injection, as well as a series of annexes that contain the source code of programs in Visual Studio : C ++.

Chapter one, The Fundamentals of Water injection, is dedicated to presenting fundamental theoretical notions on water injection.

In chapter two, Analytical Methods of Deposit Exploration Design by Water Injection, there are details about the analytical methods of deposit exploration design, through water injection.

Chapter three, Research regarding Analytical and Numerical Models Application, treats these aspects in the oil deposit sites. Case studies are designed to be applied to analytical and numerical models, made using ECLIPSE Simulator, in the case of water injection processes, on oil deposit sites.

Numerical results were compared, in each case (internal and external injection), with the ones obtained from the ECLIPSE Simulator.

The last chapter, Conclusions and Personal Contributions, synthetizes general conclusions derived from research, and also presents personal scientific contributions of the author, as well as theoretical directions on improving analytical and numerical models of simulation for water injection.

CAPITOLUL 1 .

FUNDAMENTELE INECȚIEI DE APĂ

Recuperarea primară reprezintă cantitatea de hidrocarburi care poate fi produsă prin utilizarea energiei naturale disponibile în zăcământ și în acviferul adiacent.

Recuperarea secundară (IOR) reprezintă cantitatea de hidrocarburi care poate fi produsă prin adăugarea de energie suplimentară sistemului de fluide din zăcământ prin inecția de fluide imiscibile, ca:

- Inecția de apă
- Inecția de azot
- Inecția de gaze.

Recuperarea terțiară (EOR) se refera la utilizarea acțiunii chimice, biologice sau termice pentru a îmbunătăți recuperarea țiteiului, ca:

- Inecția de abur sau CO_2
- Inecția de polimer și/sau soluții micelare.

Inecția de apă într-un zăcământ are ca efecte crește energia zăcământului și împinge țiteiul către sondele de producție. Este metoda de recuperare secundară cea mai des folosită.

Sondele de producție și inecție se pot amplasa în diferite scheme. Acestea au ca scop îmbunătățirea procesului de dezlocuire a țiteiului către apă.

Sunt două scheme principale de amplasare a sondelor:

- inecție extraconturală
- inecție intraconturală.

Rețeaua în 5 puncte

Este cea mai utilizată rețea de inecție, are o distribuție uniformă a sondelor și o eficiență ridicată a spălării.

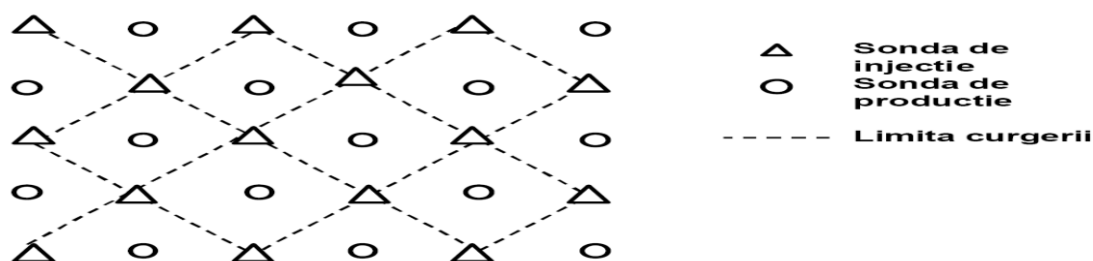


Fig. 1.3. Rețeaua în 5 puncte.

Factorii care influențează alegerea tipului de rețea sunt:

- amplasamentul actual al sondelor

- azimutul fracturilor
- anizotropia permeabilității
- geometria zăcământului
- injectivitatea
- planul de foraj de îndesire
- etanșeitatea coloanelor sondelor candidat la convertirea în injecția de apă.

Eficiența spălării orizontale (E_A)

E_A = Aria invadată de apă / Aria totală

Eficiența spălării orizontale este suprafața din planul orizontal al zăcământului care se află în spatele frontului de injecție la un moment dat raportată la suprafața totală.

Mobilitatea

În legea lui Darcy există un factor de proporționalitate, denumit mobilitatea fluidului.

$$M = \frac{\text{mobilitatea apei}}{\text{mobilitatea țiteiului}} = \frac{\frac{k \cdot k_{ra}}{\mu_a}}{\frac{k \cdot k_{rt}}{\mu_t}} = \frac{k_{ra} \cdot \mu_t}{k_{rt} \cdot \mu_a}$$

Este elementul cheie în proiectarea unui proces de injecție de apă și principalul indicator în determinarea eficienței de spălare.

Printre factorii care afectează procesul de injecție de apă amintim:

- densitatea
- barierele în calea curgerii verticale
- permeabilitatea zăcământului
- vâscozitatea țiteiului și raportul mobilităților
- discontinuitățile laterale din stratul productiv
- perforarea incompletă a stratelor poros-permeabile și lipsa de corelare între nivelele stratigrafice la care sunt perforate sondele.

Rezultatele unui proces corect de injecție de apă trebuie să țină cont de următoarele aspecte :

1. Susține producția de țitei dorită cât mai mult timp posibil.
2. Optimizează utilizarea sondelor existente cât și a celor care se vor foră.

3. Apa se injectează la un anumit debit care permite menținerea presiunii de zăcământ dorite.
4. Reduce la maximum costul injecției apei de zăcământ.
5. Ține cont de neuniformitatea zăcământului în amplasarea sondelor de injecție și reacție.
6. Utilizează eficient facilitățile de suprafață existente.
7. Se proiectează și se dezvoltă noi facilități la momentul oportun.
8. Injecția de apă menține bilanțul fluidelor introduse și extrase din zăcământ.
9. Menține ridicată producția de țiței atâta timp cât este economic posibil.
10. Reduce costul apei (este direct asociată cu producerea și injecția apei ca apă reziduală).

Principalele cerințe pentru succesul unui proces de injecție de apă sunt:

În faza de proiectare și dezvoltare se țin cont de:

- Înțelegerea zăcământului
- Inițierea timpurie a procesului de injecție
- Forajul de îndesire pentru a reduce efectele discontinuităților laterale
- Proiectarea și dezvoltarea procesului în rețele de injecție
- Deschiderea tuturor stratelor productive în toate sondele.

În faza de operare avem în vedere:

- Exploatarea sondelor de reacție la presiuni care să permită drenarea tuturor intervalelor deschise (evitarea curgerii tip “crossflow”)
- Injectarea apei la presiuni sub presiunea de fisurare a formațiunii
- Injectarea de apă curată
- Gestionarea injecției prin intermediul testelor la sondele de injecție
- Urmărirea continuă a procesului de injecție.

Monitorizarea procesului de injecție ține cont de:

- Etalonarea lunară a sondelor de producție
- Monitorizarea zilnică a debitelor și presiunilor de injecție
- Întreținerea și utilizarea corespunzătoare a aparatelor de măsură
- Monitorizarea evoluției presiunii de zăcământ.

CAPITOLUL 2

METODE ANALITICE DE PROIECTAREA EXPLOATĂRII ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI PRIN INECȚIA DE APĂ

Injectarea apei în zăcământ se face în scopul completării energiei de zăcământ necesare obținerii unor factori de recuperare finale de mărime ridicată și satisfacerii unui ritm de exploatare care să corespundă cerințelor.

2.1. INECȚIA INTRACONTURALĂ

Se va utiliza metoda Craig-Geffen-Morse, pe un model de inecție în 5 puncte aplicând teoria Buckley-Leverett sub forma propusă de Welge.

Etapele de calcul

1. Calcule pregătitoare

- a) Se calculează fracția de apă cu relația:

$$f_a = \frac{1}{1 + \frac{K_t}{K_a} \cdot \frac{\mu_a}{\mu_t}} \quad (2.1)$$

unde K_t - permeabilitatea efectivă față de țiței,

K_a - permeabilitatea efectivă față de apă,

μ_t, μ_a - vâscozitatea dinamică a țițeiului, respectiv a apei

Valorile obținute se tablează și se reprezintă grafic.

- b) Se calculează

$$\left(\frac{df_a}{dS_a} \right)_f = \frac{f_{a_{j+1}} - f_{a_{j-1}}}{S_{a_{j+1}} - S_{a_{j-1}}} \quad (2.5)$$

Valorile obținute se tablează și se reprezintă grafic.

- c) Se reprezintă variația permeabilităților relative (față de apă, respectiv țiței) în funcție de saturație.
- d) Se calculează saturația medie maximă în gaze.
- e) Se calculează saturația medie în țiței la sfârșitul regimului de gaze dizolvate.
- f) Se calculează raportul mobilităților:

$$M = \frac{K_a}{\mu_a} \frac{\mu_t}{K_t} \quad (2.9)$$

g) Se alege pasul elementului de rețea. Se va avea în vedere ca distanța dintre sonda de injecție (aflată în centrul panoului) și sondele de extracție să nu fie mai mică de 120 – 150 m.

h) Se calculează volumul de pori al elementului de rețea.

i) Se calculează resursa de țiței la începutul injecției de apă într-un panou:

$$N_{inp} = V_{pp} \cdot (1 - S_{ai} - \tilde{S}_{gin}) \cdot \frac{1}{b_{tin}} \quad (2.10)$$

j) Se calculează cumulativul de apă de injectată pentru dezlocuirea gazelor libere din pori (în ipoteza că toate gazele sunt dezlocuite de către apă).

k) Factorul de inundare areală se citește din diagramă, în funcție de raportul mobilităților.

Cumulativul de apă injectat la pătrundere este calculat cu relația:

$$W_{inj_{pt}} = V_p \cdot (\overline{S_{a_{pt}}} - S_{ai}) \cdot I_{Apt} \quad (2.12)$$

2.1.1. Comportarea până în momentul interferenței dintre două sonde de injecție alăturate

Factorul de inundare pentru W_{inj} este:

$$I_A = \frac{W_{inj}}{V_p \cdot (\overline{S_{apt}} - S_{ai})} \quad (2.18)$$

2.1.2. Comportarea între interferența și încheierea dezlocuirii gazelor

În această perioadă țițeiul fie nu curge, fie că debitul de țiței este neglijabil față de cel de injecție.

Intervalul de timp dintre interferență și „umplere”, adică înlocuirea gazelor mobile este:

$$\Delta t = \frac{W_{inj} - W_{inj.int erf}}{\frac{q_{inj.int erf} + q_{inj5}}{2}} \quad (2.20)$$

2.1.3. Comportarea între momentul încheierii dislocuirii gazelor și pătrunderea apei în sondele de țitei

În acest interval de timp, pe elementul de rețea debitul de injecție este egal cu debitul de țitei.

$$q_t = \frac{q_{inj}}{b_{t.in}} \quad (2.21)$$

2.1.4. Comportarea după pătrundere

$\frac{Q_i}{Q_p}$ se citește din tabel funcție de I_A .

Se aplică metoda Buckley-Leverett și Welge, se obține astfel:

$$\overline{S}_a - S_{a_2} = Q_i \cdot (1 - f_{a_2}) \quad (2.25)$$

$$I_A = I_{apt} + 0,2749 \ln \frac{W_{inj}}{W_{inj_i}} \quad (2.40)$$

I_A este factorul de inundare după pătrundere.

2.2. INECȚIA EXTRACONTURALĂ A APEI ÎN ZĂCĂMÂNT

2.2.1. Proiectarea procesului de injecție

Cercetările întreprinse au arătat că în situația unui zăcământ uniform, conturul petrolifer se poate deplasa paralel în cazul când distanța sondelor de injecție față de conturul petrolifer satisface relația:

$$X \geq 0,1 \cdot 2 \cdot \sigma_{inj} \cdot \left(\frac{2\sigma_{inj}}{X + a} + 3,3 \right) \quad (2.41)$$

unde:

X - distanța liniei sondelor de injecție față de conturul interior petrolifer în poziția lui inițială;

a - distanța dintre linia sondelor de injecție și primul șir de sonde de extracție;

$2\sigma_{inj}$ - distanța dintre sondele de injecție;

n_{inj} - se determină dând diverse valori pentru n_{inj} care trebuie să rezulte și din calcul.

Pentru diferite valori ale timpului se obțin diverse valori pentru debitul adimensional.

În funcție de aceste valori se va calcula debitul de pierderi.

2.2.2. Prevederea comportării în exploatare

1. Începutul injectiei până când frontul de dezlocuire pătrunde pe şirul 1 de extracţie:

$$T_0 < t < t_{p1}$$

t_{p1} - timp de pătrundere al frontului pe şirul 1 de extracţie

$$t_{p1} = \frac{S \cdot h \cdot m \cdot L_1}{Q_{inj}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dfa}{dSa}\right)_f} \quad (2.49)$$

unde:

S_{af} , $\bar{S}_{af}$, $\left(\frac{dfa}{dSa}\right)_f$ sunt valori obţinute din profilul saturaţiilor pe baza modelului

Buckley-Leverett.

$$Q_{inj} = Q_{extr} = Q_{ex1} + Q_{exe} \quad (2.50)$$

În această perioadă ambele şiruri produc fără apă:

$$\Delta N_I = \Delta N_1 + \Delta N_2 = S \cdot h \cdot m \cdot L_1 (\bar{S}_{af} - S_{a1}) \quad (2.51)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta N_I}{N} \quad (2.52)$$

2. Perioada dintre pătrunderea frontului de dezlocuire pe primul şir şi pătrunderea frontului pe şirul 2.

$$t_{p1} < t < t_{p2}$$

t_{p2} - timp de pătrundere al frontului pe şirul 2 de extracţie

$$t_{p2} = t_{p1} + \frac{S \cdot h \cdot m \cdot L_2}{Q_{ex2}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dfa}{dSa}\right)_f} \quad (2.53)$$

Pe primul şir saturaţia în apă creşte de la S_{ai} brusc la S_{af} şi mai departe până la valoarea

1.

Din acest moment fa_1 creşte continuu, iar $fa_2 = 0$.

Pe primul şir fa_1 ia valori de la fa_f la 1.

$$\bar{S}_{a1} = S_{a1} + \frac{1 - f_{a1}}{\left(\frac{dfa}{dSa}\right)_{S_{a1}}} \quad (2.54)$$

$\bar{S}_{a1}$ - saturaţia medie între linia de extracţie1 şi poziţia iniţială a frontului de dezlocuire.

$$Q_{t1} = Q_{ex1} \cdot (1 - f_{a1}) \quad (2.55)$$

$$\Delta N_{II} = S \cdot h \cdot m \cdot L_1 \cdot (\bar{S}_{a1} - S_{ai}) + S \cdot h \cdot m \cdot L_2 \cdot (\bar{S}_{af} - S_{ai}) \quad (2.57)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta N_{II}}{M} \quad (2.58)$$

3. Pătrunderea frontului de dezlocuire în șirul 2 până la pătrunderea frontului de dezlocuire în șirul 3.

$$t_{p2} < t < t_{p3}$$

Se calculează timpul la care frontul de dezlocuire ajunge la șirul 3.

$$t_{p3} = t_{p2} + \frac{S \cdot h \cdot m \cdot L_3}{Q_{ex3}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{dfa}{dSa}\right)_f} \quad (2.59)$$

4. Pentru șirul 3 se calculează similar șirurilor 1 și 2.

2.3. Alte metode de proiectare a exploatării zăcămintelor de țiței prin injecția de apă

2.3.1. Modelul Dykstra-Parsons

Luând în discuție neuniformitatea pe verticală a zăcămintelor, rezultă că, practic, toate zăcămintele de tip sedimentar prezintă stratificație. Pentru a fi luată în considerare această stratificație și deci, pentru a fi evaluat factorul de inundare pe verticală la injecția de apă într-un astfel de sistem, au fost propuse diverse modele [8], cel mai utilizat fiind însă, cel care consideră sistemul format dintr-o succesiune de strate continue care comunică numai în sondele de injecție și de extracție. Stratele pot avea aceeași grosime sau pot fi de grosimi diferite și pot avea sau nu aceleași proprietăți fizice, obligatorie fiind însă existența unei permeabilități absolute diferită pe fiecare strat [9,10].

Se consideră un sistem de n strate de lungime L , lățime B și grosime totală $H = \sum_{j=1}^n h_j$

Proiectarea exploatării într-un astfel de sistem consideră că dezlocuirea are loc la cădere de presiune constantă ($\Delta p = ct$); stratele fiind separate continuu, comportarea sistemului este dată de suprapunerea în timp a comportărilor ale fiecărui strat.

La nivelul fiecărui strat curgerea este liniară și staționară, iar injecția se va face la bilanț, așa încât

$$Q_{inj} = \sum_{i=1}^n q_{inj\ i} = Q_{ex} \quad (2.75)$$

Dacă (fig. 2.12) x_{fi} este poziția frontului la un moment dat în stratul i și $q_{inj\ i}$ fracția din debitul total de injecție ce se repartizează pe acest strat, care se consideră același atât în fața cât și în spatele frontului, atunci în cazul curgerii staționare putem scrie pentru zona apă:

$$q_{inj} = B \cdot h_i \cdot \frac{K_i \cdot k_a}{\mu_a} \cdot \frac{\Delta p_a}{x_{fi}} \quad (2.76)$$

iar pentru zona țiței

$$q_{inj} = B \cdot h_i \cdot \frac{K_i \cdot k_t}{\mu_t} \cdot \frac{\Delta p_t}{L - x_{fi}} \quad (2.77)$$

unde:

Δp_a - căderea de presiune în zona inundată;

Δp_t - căderea de presiune în zona de țiței unde $k_t = 1$.

Căderea de presiune pe strat:

$$\Delta p = \Delta p_a + \Delta p_t = \frac{q_{inj_i}}{h_i \cdot B} \cdot \frac{1}{K_i} \cdot \left[\frac{\mu_a}{k_a} \cdot x_{fi} + \mu_t \cdot (L - x_{fi}) \right] \quad (2.78)$$

$$q_{inj_i} = \frac{B \cdot h_i \cdot K_i \cdot \Delta p}{\frac{L}{M_t} + \left(\frac{1}{M_a} - \frac{1}{M_t} \right) \cdot x_{fi}} \quad (2.79)$$

Poziția frontului de dezlocuire :

$$x_{fi} = \frac{1}{\left(\frac{1}{M_t} - \frac{1}{M_a} \right)} \cdot \left[\frac{L}{M_t} - \sqrt{\frac{L^2}{M_t^2} - 4 \left(\frac{1}{M_t} - \frac{1}{M_a} \right) \cdot \frac{K_i \cdot \Delta p}{m \cdot (\bar{S}_a - S_{ai})} \cdot t} \right] \quad (2.83)$$

pentru un timp t cunoscut.

Aranjarea fictivă a stratelor în ordinea descrescătoare a permeabilității absolute, a permis elaborarea următorului algoritm de calcul a comportării sistemului de n strate:

1. Se calculează timpul de inundare al stratului 1 (cel mai permeabil) din ecuația (2.83)

unde $x_{f1} = L$ și $t = t_{p1}$:

$$t_{p1} = \frac{m \cdot \Delta S_a}{4 \cdot K_1 \cdot \Delta p} \cdot L^2 \cdot \left(\frac{1}{M_t} + \frac{1}{M_a} \right) \quad (2.84)$$

unde $\Delta S_a = \bar{S}_a - S_{ai}$

2. Se calculează pozițiile frontului x_{fi} la momentul t_{p1} pe celelalte strate cu ecuația (2.83)

unde t se înlocuiește cu t_{p1}

$$x_{fi} = \frac{L}{\left(\frac{1}{M_t} - \frac{1}{M_a}\right)} \cdot \left[\frac{1}{M_t} - \sqrt{\frac{1}{M_t^2} - \left(\frac{1}{M_t^2} - \frac{1}{M_a^2}\right) \cdot \frac{K_i}{K_1}} \right] (i = 2, 3, \dots, n) \quad (2.85)$$

3. Se blochează stratul 1 și se evaluează parametrii de comportare ai stratelor individuale și se însumează rezultatele, obținându-se comportarea sistemului pe ansamblu la momentul t_{p1} .

$$I_{h1} = \frac{\text{Aria secțiunii inundată de apă}}{\text{Aria întregii secțiuni}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot x_{fi}}{L \cdot H} \quad (2.86)$$

debitul de fluide extrase la momentul t_{p1}

$$Q_{a1} = q_{inj1}; Q_{t1} = \sum_{i=1}^n q_{inj_i} \quad (2.87)$$

întrucât stratele 2, 3, ..., n produc numai țigui

- factorul de recuperare la momentul t_{p1}

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta N_1}{N} \quad (2.89)$$

Se continuă și cu inundarea celorlalte strate obținându-se $t_{p2}, x_{f3,4,\dots,n}, q_{inj2,3,\dots,n}, I_{h2}, Q_{a2}, Q_{t2}, f_{az2}, \Delta N_2, \varepsilon_2$ până la inundarea stratului n.

Folosind teoria Lozd Kerd în combinație cu teoria Dykstra-Parsons se poate face proiectarea exploatarei unui zăcământ cu două sau mai multe șiruri de extracție [22].

2.3.2. Modelul Craig-Geffen-Morse

Modelul Craig, Geffen și Morse este construit pentru exploatarea unui sistem de injecție în cinci puncte la debit constant de injecție.

Algoritmul de calcul folosit pentru prevedere este următorul:

$$\text{Se calculează raportul } M = \frac{M_t}{M_a}, \quad (2.91)$$

Pentru că în spatele frontului de dezlocuire [3,11] există o zonă de amestec apă-țiței cu saturație variabilă în apă, modelul consideră pentru k_a valoarea corespunzătoare unei saturații în apă egală cu [11] :

$$1. \quad \overline{S_{af}} = S_{af} + \frac{1 - f_{af}}{\left(\frac{df_a}{dS_a}\right)_f} \quad (2.94)$$

2. Din figura 2.14 se găsește valoarea factorului de inundare la pătrundere I_p , sau se calculează cu relația [12]:

$$I_p = 0.5133 + 0.1682 \cdot \frac{1}{M} - 0.0015 \frac{1}{M^2} \quad (2.95)$$

3. Se calculează

$$W_{inj\ p} = V_p \cdot (\overline{S_a} - S_{ai}) \cdot I_p \quad (2.96)$$

unde V_p este volumul de pori al sistemului de injecție în cinci puncte.

4. Cunoscându-se debitul constant de injecție pe strat se poate determina durata exploatării până la pătrundere

$$t_p = W_p / Q_{inj} \quad (2.97)$$

5. Se dă o creștere $\Delta W_{inj\ j-1}^j$ a cumulativului de apă injectată pe etapa de la t_{j-1} la t_j și se calculează:

$$\frac{W_{inj\ j}}{W_{inj\ p}} = \frac{W_{inj\ j-1} + \Delta W_{inj\ j-1}^j}{W_{inj\ p}} \quad (2.98)$$

6. valoarea corespunzătoare a factorului de inundare I se citește din diagramă, sau se calculează cu ajutorul relației [12]:

$$I = I_p + \frac{1}{1.5744} \cdot \lg \frac{W_{inj\ j}}{W_{inj\ p}} \quad (2.99)$$

7. Se calculează volumul de pori inundat.

8. Se calculează [3,11]:

$$\frac{df_a}{dS_a} = \frac{V_{pi}}{W_{inj}} \quad (2.101)$$

9. Pentru zăcămintul în studiu se cunoaște variația permeabilităților relative k_a și k_t cu saturația S_a , precum și a vâscozităților celor două faze: μ_a și μ_t . Și se trasează variația $f_a(S_a)$ apoi df_a/dS_a funcție de S_a .

10. Se calculează valoarea saturației în apă la nivelul sondei de extracție S_{a2} , pentru care $df(a)/dS_a$ are valoarea dată de 2.18.

11. Se calculează f_{a2} .

12. Avem:

$$Q_t = Q_{inj} \cdot (1 - f_{a2}) \quad (2.103.a)$$

$$Q_a = Q_{inj} \cdot f_{a2} \quad (2.103.b)$$

13. Timpul scurs până la atingerea saturației S_{a2} în galeria de extracție este:

$$t_j = t_{j-1} + \frac{\Delta W_{inj,j-1}^j}{Q_{inj}} \quad (2.104)$$

14. Pentru acest timp se calculează :

$$\bar{S}_{aj} = S_{a2} + \frac{1 - f_{a2}}{\left(\frac{df_a}{dS_a} \right)_2} \quad (2.105)$$

15. Cantitatea de țiței extrasă în etapa de la t_{j-1} la t_j provine atât din zona nou inundată, cât și din zona inundată anterior.

$$\Delta N_a + \Delta w = \Delta W_{inj,j-1}^j - \Delta N_n \quad (2.108)$$

16. Cunoscându-se $S_{a2,j}$ și $S_{a2,j-1}$ se poate calcula $f_{a2,j}$ și $f_{a2,j-1}$, dar și cantitatea de apă extrasă pentru fiecare etapă :

$$\Delta w_{j-1}^j = (\Delta W_{inj,j-1}^j - \Delta N_n) \cdot f_{a_{med}} \quad (2.110)$$

17. Se calculează acum:

$$\Delta N_{j-1}^j = \Delta N_a + \Delta N_n \quad (2.111)$$

Faptul că metoda Craig – Geffen – Morse a condus la debit de injecție constant pe strat, face ca performanțele sistemului să nu depindă de permeabilitatea absolută.

3. 3. 3. Modelul Stiles

Modelul Stiles se aplică la zăcămintele la care raportul mobilităților este unitar ($M=1$), adică are bază presupunerea că dezlocuirea este de tip piston în fiecare strat, iar curgerea este unidimensională staționară. Spălarea se face la cădere de presiune constantă.

Apă și țițeiul au aceleași viteze și aplicând legea Darcy obținem:

$$M \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} = \frac{\partial p_t}{\partial x} \quad (2.113)$$

Pentru $M=1$, modelul Stiles implică egalitatea gradientilor de presiune în apă și țiței.

Producțiile cumulative de țiței pentru straurile j și k sunt date de relațiile:

$$N_{pj} = m_j \cdot b \cdot h_j \cdot l \cdot (1 - s_{tr} - s_{ai}) \quad (2.120)$$

$$N_{pk} = m_k \cdot b \cdot h_k \cdot \frac{k_k}{k_j} l \cdot (1 - s_{tr} - s_{ai}) \quad (2.121)$$

Producția cumulativă de țiței pentru întreg zăcământul în momentul inundării stratului j este dată de expresia următoare:

$$N_p = \left(\sum_{i=1}^j m_i \cdot h_j + \frac{1}{k_j} \sum_{i=j+1}^n m_i \cdot k_i \cdot h_i \right) \cdot b \cdot l \cdot (1 - s_{tr} - s_{ai}) \quad (2.122)$$

Pentru $m_j = m$ (oricare $j = \overline{1, n}$) și notând cu C_{to} , C_j capacitățile de producție totală, respectiv până la stratul j inclusiv avem :

$$N_p = \left[\sum_{i=1}^j h_i + \frac{1}{k_j} (C_{to} - C_j) \right] m \cdot b \cdot l \cdot (1 - s_{tr} - s_{ai}) \quad (2.125)$$

Fracția debitului de apă, pentru $M \neq 1$:

$$f_a = \frac{Q_a}{Q_a + Q_t} = \frac{MC_j}{MC_j + C_{to} - C_j} \quad (2.127)$$

iar pentru $M=1$, expresia are forma: $f_a = \frac{C_j}{C_{to}}$ (2.128)

CAPITOLUL 3

CERCETĂRI PRIVIND APLICAREA MODELELOR ANALITICE, RESPECTIV NUMERICE, ÎN CAZUL UNOR PROCESE DE INIECȚIE DE APĂ, ÎN ȘANTIERELE DE PETROL. STUDII DE CAZ.

Fie un zăcământ care are principalele caracteristici:

- Aria zonei productive - $4 \cdot 10^4 \text{ m}^2$;
- Lățimea - 200 m;
- Lungimea - 200 m
- Grosimea efectivă medie - 5 m;
- Vâscozitatea dinamică a apei de zăcământ – 0,65 cP;
- Porozitatea efectivă medie - 20 %;
- Saturația în apă ireductibilă – 20 %;
- Factorul de volum al țițeiului la presiunea inițială de zăcământ - 1,045 ;
- Permeabilitatea absolută medie a rocii colectoare – 417,6 mD.

3.1. Injecția intraconturală. Studiu de caz.

Se va utiliza metoda Craig-Geffen-Morse, pe un model de injecție în 5 puncte aplicând teoria Buckley-Leverett sub forma propusă de Welge.

Exploatarea unui panou de injecție poate avea loc fie la debit de injecție constant, fie la o cădere de presiune constantă, între sonda de injecție și cea de extracție.

Se cunosc următoarele date de la sfârșitul exploatării în regim de gaze dizolvate:

- Presiunea medie de zăcământ – 32 bar;
- Factorul de volum al țițeiului - 1,029 ;
- Vâscozitatea dinamică a țițeiului la presiunea de zăcământ – 3,42 cP.

Aplicând metoda prezentată în capitolul 2 s-au obținut următoarele valori care sunt reprezentate grafic în figura 3.1.

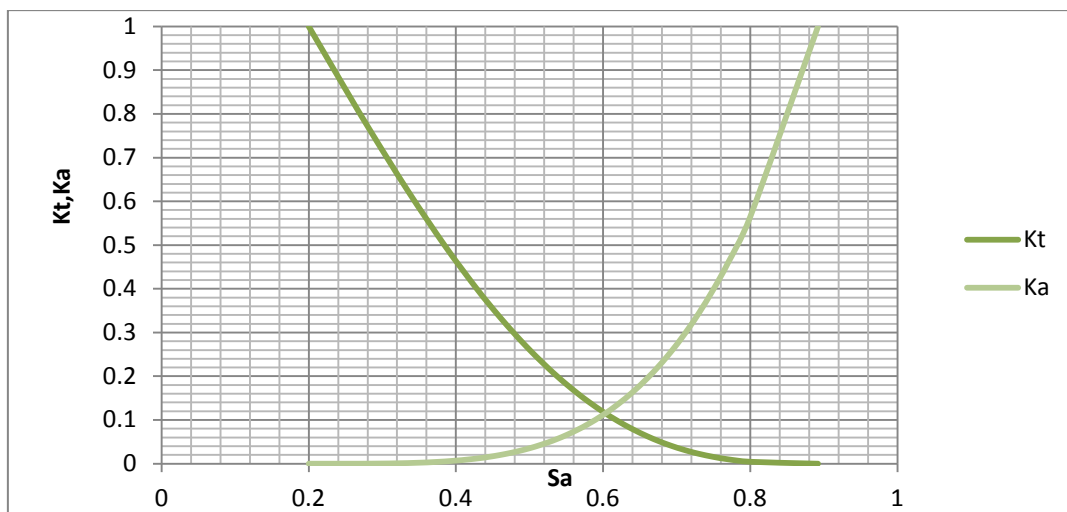


Fig. 3.1. Variația permeabilităților relative (față de apă, respectiv țiței) în funcție de saturație

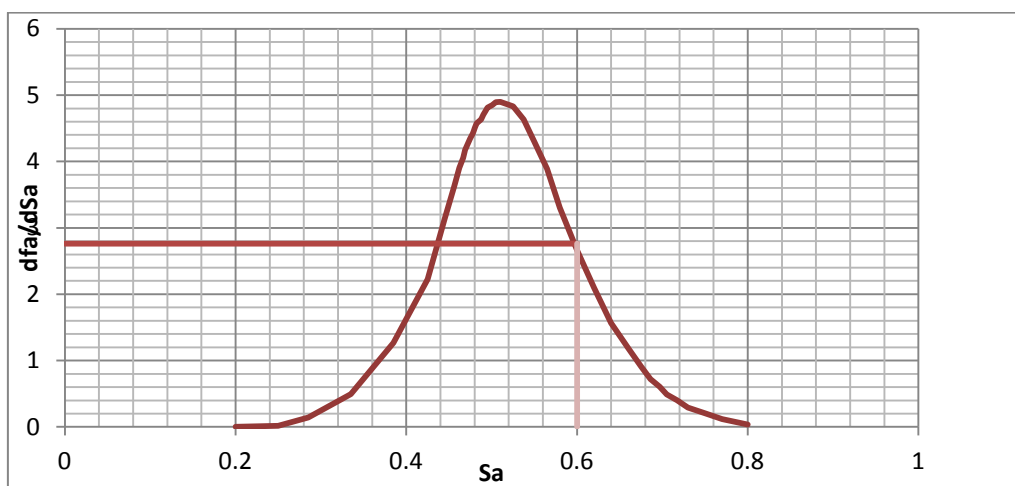


Fig. 3.2. Variația $\frac{df_a}{dS_a}$ în funcție de saturație.

Deoarece pentru calcularea permeabilităților, a fracției de apă și a derivatei se necesită mult timp am elaborat un program în Visual Studio: C++ .

În figura 3.4. este prezentată schema logică a programului FRAPA care calculează permeabilitățile relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata).

Acest program, denumit FRAPA, permite calculul permeabilităților relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata), iar rezultatele obținute pot fi redactate într-o foaie de calcul EXCEL.

În cele ce urmează se vor prezenta câteva exemple care pot demonstra acuratețea programului.

Exemplul 1 este realizat pentru pasul de calcul 0,03 și 20 de valori ale saturației.

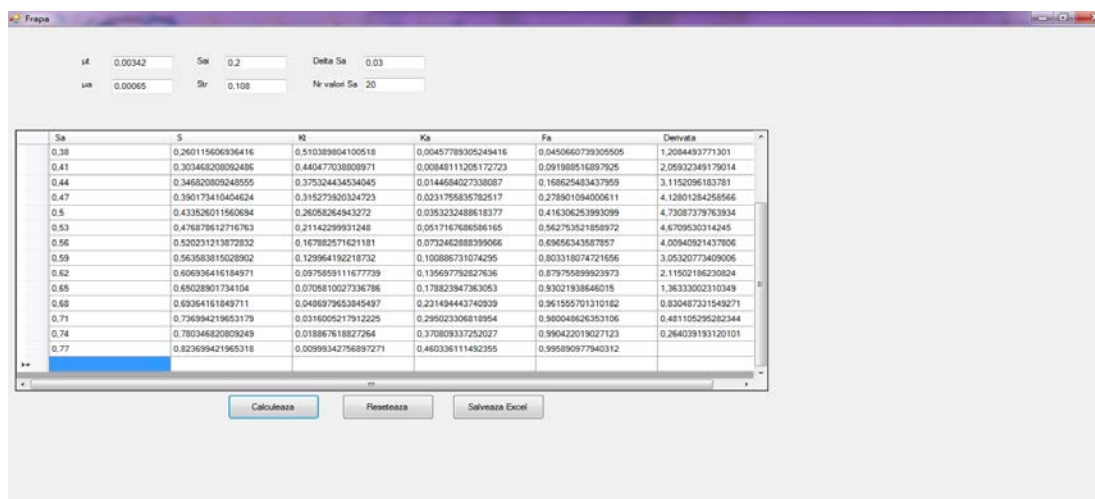


Fig. 3. 5. Exemplul 1 de calcul realizat cu programul FRAPA.

Dacă se apasă butonul “Salveaza Excel” se va genera automat un tabel .

3.1.1. Comportarea până în momentul interferenței dintre două sonde de injecție alăturate

Tabelul 3. 10. Rezultatele calculelor efectuate pentru comportarea până în momentul interferenței dintre două sonde de injecție alăturate.

W_{inj} impus (m^3)	r_c (m)	r_f (m)	Numitor (cP)	q_{inj} (m^3/zi)	$\bar{q}_{inj}$ (m^3/zi)	Δt (zile)	t (zile)
500	34,88266	17,0925	7,741454	117,1356	-	4,268557	4,268557
1000	49,33153	24,17245	8,280901	109,505	113,3203	9,132003	13,40056
1500	60,41854	29,60508	8,596456	105,4853	107,4952	14,21999	27,62055
2000	69,76532	34,18501	8,820347	102,8077	104,1465	19,45379	47,07433
2500	78	38,22	8,99401	100,8227	101,8152	24,79601	71,87035
3000	85,44472	41,86791	9,135903	99,25675	100,0397	30,22465	102,095
3500	92,29084	45,22251	9,255872	97,97024	98,61349	35,72513	137,8201
4000	98,66306	48,3449	9,359793	96,88248	97,42636	41,28713	179,1073
4084,07	99,6945	48,85031	9,375981	96,71521	-	42,2278	221,3351

3.1.2. Comportarea între interferență și încheierea dezlocuirii gazelor

Intervalul de timp dintre interferență și „umplere”, adică înlocuirea gazelor mobile este:

$$\Delta t = 17,72 \text{ zile}$$

Timpul rămas până la interferență este:

$$22,3351 + 17,72 = 239 \text{ zile}$$

3.1.3. Comportarea între momentul încheierii dislocuirii gazelor și pătrunderea apei în sondele de țitei

Tabelul 3. 11. Rezultatele calculelor pentru comportarea între momentul încheierii dislocuirii gazelor și pătrunderea apei în sondele de țitei.

Winj (m ³ /zi)	IA (-)	Δt (zile)	t (zile)	ΔN (m ³)	ε (%)
5200	0,24076	0	0	0	20,28582
5500	0,25465	10,51156	10,51156	291,5452	21,45616
5800	0,26854	10,51156	21,02313	583,0904	22,62649
6100	0,28243	10,51156	31,53469	874,6356	23,79683
6400	0,29632	10,51156	42,04625	1166,181	24,96716
6700	0,31021	10,51156	52,55781	1457,726	26,1375
7000	0,3241	10,51156	63,06938	1749,271	27,30784
7300	0,33799	10,51156	73,58094	2040,816	28,47817
7600	0,35188	10,51156	84,0925	2332,362	29,64851
7900	0,36577	10,51156	94,60406	2623,907	30,81884
8200	0,37966	10,51156	105,1156	2915,452	31,98918
8500	0,39355	10,51156	115,6272	3206,997	33,15951
8800	0,40744	10,51156	126,1388	3498,542	34,32985

9100	0,42133	10,51156	136,6503	3790,087	35,50019
9400	0,43522	10,51156	147,1619	4081,633	36,67052
9700	0,44911	10,51156	157,6734	4373,178	37,84086
10000	0,463	10,51156	168,185	4664,723	39,01119
10300	0,47689	10,51156	178,6966	4956,268	40,18153
10600	0,49078	10,51156	189,2081	5247,813	41,35187
10900	0,50467	10,51156	199,7197	5539,359	42,5222
11200	0,51856	10,51156	210,2313	5830,904	43,69254
11500	0,53245	10,51156	220,7428	6122,449	44,86287
11800	0,54634	10,51156	231,2544	6413,994	46,03321
12100	0,56023	10,51156	241,7659	6705,539	47,20354
12312	0,570046	10,51156	252,2775	6911,565	48,03058

Rezultatele obținute, în urma aplicării formulelor se tablează (tabelul 3.12.) și se reprezintă grafic (fig. 3.22) .

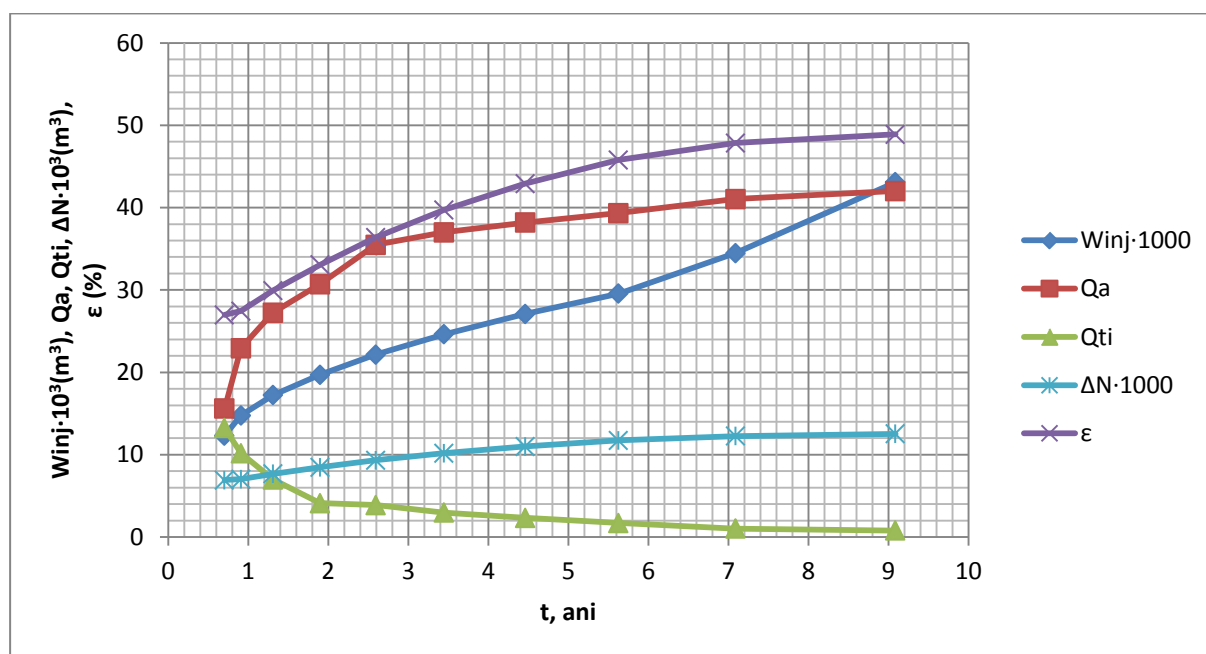


Fig. 3. 22. Variația în timp a parametrilor exploatării la injecția intraconturală.

Injecția de apă se aplică simultan în cele 5 panouri.

Factorul de recuperare pe zăcământ este :

$$\varepsilon = 0,4889272 \cdot 0,866128 = 0,414493 = 41,45 \%$$

Din modelul pentru zăcămintul care a fost exploatat a rezultat un factor de recuperare final al țițeiului de 41,45 %

3.2. Injecția extraconturală. Studiu de caz.

3.2. 1. Proiectarea procesului de injecție

Se aplică algoritmul pentru $X=950\text{m}$.

$$p_{\text{strat}} = p_{\text{sat}} + 5 = 32 + 5 = 37 \text{ bar}$$

Se impune $Q_{\text{ex}} = 900 \text{ m}^3/\text{zi}$ ($450 \text{ m}^3/\text{zi}$ pentru primul șir de sonde de extracție și $450 \text{ m}^3/\text{zi}$ pe cel de-al doilea șir).

Pentru diferite valori ale timpului se obțin diverse valori pentru debitul adimensional. În funcție de aceste valori se va calcula debitul de pierderi.

Tabelul 3. 13. Rezultatele calculelor efectuate.

$t,$ (zile)	$\bar{t}$	$\tilde{\omega}$	$Q_{\text{pierderi}},$ (m^3/zi)
100	22,5	0,4466	151,8485
200	45	0,422	143,4842
300	67,5	0,3981	135,358
400	90	0,3581	121,7576
500	112,5	0,3162	107,5112

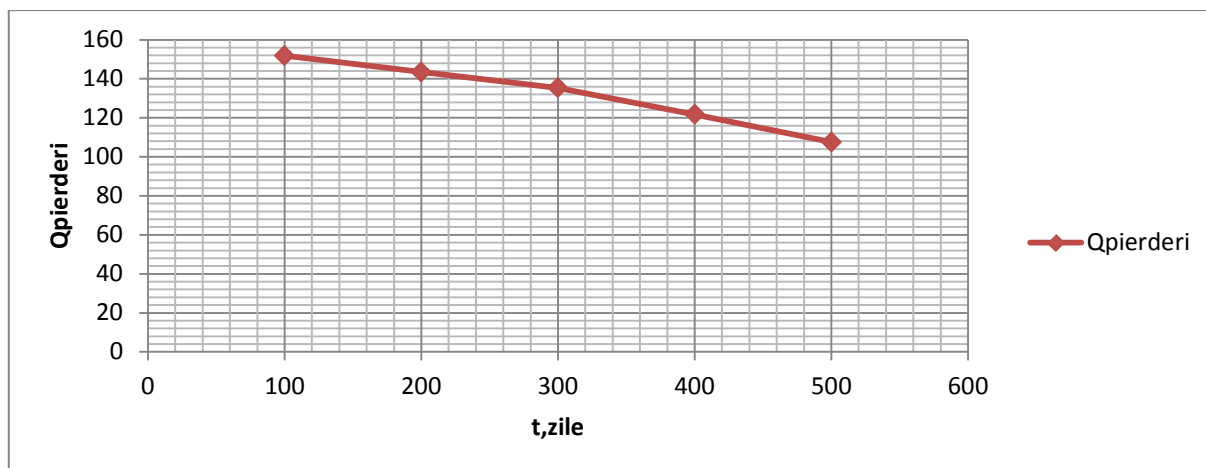


Fig. 3. 23. Variația în timp a debitului de pierderi.

3.2. 2. Prevederea comportării în exploatare

Se cunosc următorii parametri ai exploatarei:

$$S_{af} = 0,6 \text{ și } \bar{S}_{af} = 0,74, \left(\frac{dfa}{dSa} \right)_f = 2,658868$$

În această perioadă ambele șiruri produc fără apă: $\begin{cases} fa = 0 \\ ft = 1 \end{cases}$

Pe primul șir saturația în apă crește de la $S_{ai} = 0,21$ brusc la $S_{af} = 0,69$ și mai departe până la valoarea 1. Din acest moment fa_1 crește continuu, $fa_2 = 0$. Pe primul șir fa_1 ia valori de la fa_f la 1. Având în vedere că fracția de apă pe primul șir ajunge la 0,979, primul șir se închide și începe exploatarea șirului 3, cu un debit de $Q_{ex3} = 250 \text{ m}^3/\text{zi}$.

Tabelul 3.18. Rezultatele calculelor efectuate în urma aplicării injecției de apă extraconturală pe zăcământul considerat.

t, (zile)	t, (ani)	$\Delta N,$ (m^3)	$\varepsilon,$ (%)
0	0	0	0
194	0,538889	110770	7,9
1009	2,802778	348150	14,9
1629	4,525	611674	23,54
1971	5,475	647084	27,39
2793,6	7,67	768904	33,33
3283,2	9,12	782375	39,45

Din modelul pentru zăcământul care a fost exploatat a rezultat un factor de recuperare final al țițeiului, varianta injecției extraconturală de apă, de 39,45 %.

3.3. Modelul Dykstra-Parsons. Studiu de caz.

Dykstra și Parsons au prezentat o metodă de predicție pentru zăcămintele stratificate. Metoda se aplică pentru o gama largă de valori. Johnson prezintă o abordare simplificată a metodei Dykstra – Parsons, care este utilă în cazul, în care se cer estimări rapide.

Ipoteze :

- Cădere de presiune este constantă pentru fiecare strat ($\Delta p = ct$) ;
- Zăcământul este format din strate izolate;
- La nivelul fiecărui strat curgerea este liniară și staționară ;
- Cu excepția permeabilității, toate celelalte proprietăți ale fluidului și a rocii, sunt uniforme.

Tabelul. 3. 20. Rezultatele calculelor efectuate în urma aplicării modelului Dykstra- Parsons.

j	N_p	Q_a	Q_t	f_a	R_{at}	t
–	m^3	$m^3/zî$	$m^3/zî$	–	m^3/m^3	zile
1	10.650,03	478,3985	461,5606	0,508957	1,04	179,1692
2	19.051,16	757,7393	137,7739	0,846151	5,50	436,4562
3	38.630,40	872,2983	0,0000	1,000000	∞	1.047,4948

$$\varepsilon=44,47\%.$$

Din modelul de zăcământ care a fost exploatat a rezultat un factor de recuperare, folosind metoda Dykstra-Parsons, al țițeiului de 44,47 %.

3. 4. Modelul Craig- Geffen- Morse. Studiu de caz

V_{to}	V_{to}/V_{toi}	N_p	R_{at}	E_A	Q_{to}	Q_a	Q_t	t	
m^3	—	m^3	m^3/m^3	—	m^3/zi	m^3/zi	m^3/zi	zile	
0,00	0,0000	0,00	0,000	0,000000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
32,61	0,1000	32,61	0,000	0,066330	3,2206	0,0000	3,2206	20,2532	
65,23	0,2000	65,23	0,000	0,132660	3,1555	0,0000	3,1555	30,4832	
97,84	0,3000	97,84	0,000	0,198990	3,0904	0,0000	3,0904	40,9263	
130,45	0,4000	130,45	0,000	0,265320	3,0254	0,0000	3,0254	51,5916	
163,07	0,5000	163,07	0,000	0,331649	2,9603	0,0000	2,9603	62,4887	
195,68	0,6000	195,68	0,000	0,397979	2,8627	0,0000	2,8627	73,6902	
228,29	0,7000	228,29	0,000	0,464309	2,7977	0,0000	2,7977	85,2136	
260,91	0,8000	260,91	0,000	0,530639	2,7326	0,0000	2,7326	97,0081	
293,52	0,9000	293,52	0,000	0,596969	2,6675	0,0000	2,6675	109,0869	
326,13	1,0000	326,13	0,110	0,663299	2,6025	2,1654	0,4371	121,4639	inundare
513,76	1,5753	339,79	0,033	0,787818	2,6675	2,5532	0,1144	192,6694	
701,39	2,1506	344,41	0,029	0,873115	2,7651	2,6704	0,0947	261,7431	
889,02	2,7259	347,08	33,548	1,000000	2,9278	2,8430	0,0847	327,6591	$E_A = 1$
1.076,64	3,3012	350,40	39,342	1,000000	3,2206	3,1407	0,0798	388,6924	
1.264,27	3,8765	353,21	48,449	1,000000	7,5026	7,3509	0,1517	423,6870	
1.451,90	4,4518	355,60	57,933	1,000000	7,7775	7,6456	0,1320	448,2453	
1.639,52	5,0271	357,64	67,804	1,000000	8,0120	7,8956	0,1164	472,0113	
1.827,15	5,6024	359,33	78,131	1,000000	8,2170	8,1131	0,1038	495,1338	
2.014,78	6,1778	360,78	88,886	1,000000	8,3957	8,3023	0,0934	517,7222	
2.202,41	6,7531	362,12	99,925	1,000000	8,5607	8,4759	0,0848	539,8528	
2.390,03	7,3284	363,28	111,357	1,000000	8,7049	8,6274	0,0775	561,5870	
2.577,66	7,9037	364,29	123,239	1,000000	8,8296	8,7585	0,0711	582,9880	
2.765,29	8,4790	365,32	135,189	1,000000	8,9601	8,8943	0,0658	604,0819	
2.952,91	9,0543	366,17	147,670	1,000000	9,0731	9,0121	0,0610	624,8910	
3.140,54	9,6296	366,91	160,630	1,000000	9,1715	9,1148	0,0567	645,4588	
3.328,17	10,2049	367,73	173,429	1,000000	9,2794	9,2262	0,0532	665,7968	
3.515,80	10,7802	368,43	186,708	1,000000	9,3725	9,3226	0,0499	685,9156	
3.703,42	11,3555	369,04	200,492	1,000000	9,4530	9,4061	0,0469	705,8489	
3.891,05	11,9308	369,57	214,801	1,000000	9,5231	9,4789	0,0441	725,6241	

Tabelul 3.23. Rezultatele parțiale ale calculelor efectuate pentru metoda C- G-M.

3. 5. Modelul Stiles. Studiu de caz.

Tabelul 3. 25. Rezultatele calculelor efectuate în urma aplicării metodei Stiles.

j	C_j	N_p	Q_a	Q_t	f_a	f_a	R_{at}	t
–	mD·m	m ³	m ³ /zi	m ³ /zi	–	–	m ³ /m ³	zile
1	1272,84	25836,53	204,1422	95,5639	0,681141	0,866596	2,14	60,9175
2	2492,04	40416,48	342,5835	7,9637	0,977282	0,991339	43,02	148,3951
3	2644,44	49743,36	302,9451	0,0000	1,000000	1,000000	∞	712,2965

Avantajele metodei Craig- Geffen- Morse în comparație cu metodele Stiles și Dykstra-Parson

Cercetările au arătat că, față de metodele Stiles și Dykstra-Parsons, metoda Craig – Geffen - Morse prezintă o serie avantaje și anume:

- admite existența miscării fracționale în zona spalată de către apă,
- ține cont de creșterea în timp a eficienței spălării zonei inundate de către apă.

Dezavantajele metodei Craig – Greffen -Morse, care trebuie să fie rezolvate în vederea folosirii în situații practice a acestui model sunt:

- faptul că se presupune că zăcămintul este format dintr-un singur strat de permeabilitate constantă,
- admite că eficiența spălării areale poate atinge valoarea maxima: $E_A = 1$.

3.6. Modelarea numerică a injecției de apă folosind simulatorul **ECLIPSE**

3.6.1. Modelarea numerică a exploatării zăcămintelor de hidrocarburi fluide

Scopul modelării numerice a exploatării zăcămintelor este de a estima performanțele acestora în ipoteza aplicării în exploatare.

Conducerea unui proces de potrivire a istoricului de exploatare include următoarele etape:

1. Adunarea datelor din istoric;
2. Cercetarea datelor și evaluarea calității lor;
3. Definirea obiectivelor specifice ale potrivirii istoricului de exploatare;
4. Dezvoltarea unui model preliminar care are la bază cele mai bune date disponibile;
5. Simularea istoricului cu modelul preliminar și compararea rezultatelor cu performanțele zăcămintului;
6. Se decide dacă modelul este satisfăcător; dacă nu, se analizează rezultatele cu modele simple de investigații hidrodinamice, pentru identificarea schimbărilor corespunzătoare în model, care să îmbunătățească relația între performanțele observate și cele calculate;
7. Se decide dacă poate fi folosit un program automat de potrivire a istoricului;
8. Se fac schimbări în model în colaborare cu geologii, personalul operațional din producție și inginerii de zăcămint pentru a confirma realismul schimbărilor propuse;
9. Se simulează din nou o parte sau chiar toți parametrii de comportare pentru îmbunătățirea potrivirii de istoric, analizând rezultatele ca și la etapa 6;
10. Se reiau etapele 6, 8 și 9 până când se obține o bună potrivire a datelor calculate cu cele observate.

Fiecare studiu de zăcămint va furniza un set unic de probleme în timpul procesului de potrivire a istoricului de exploatare.

3.6.2. Pachete de programe specializate

Necesitatea de a simula cât mai exact comportarea unui zăcămint, cu minim de efort și maxim de fidelitate, a condus la realizarea unor pachete de programe specializate cum ar fi **BOAST**, **CMG**, **SURE**, **PETREL** sau **ECLIPSE**.

Pachetele **PETREL** și **ECLIPSE** sunt elaborate de Compania Schlumberger și oferă cel mai complet set de soluții numerice de predicție pentru toate tipurile de zăcămint.

ECLIPSE citește fișierul datelor de intrare secțiune cu secțiune, și procesează fiecare secțiune pe rând odată ce secțiunea a fost citită. Prima sarcină realizată de **ECLIPSE** este să aloce memoria pentru datele de intrare. Deși este dimensionat dinamic și rezervă atâta memorie cât este necesară întregii simulări, diferite tipuri de informații ale simulării necesită capacități de memorie diferite.

Concret, dacă ne referim la modelarea numerică prin diferențe finite se disting următoarele etape:

- o etapa discredizării domeniului, acest fapt se realizează prin împărțirea domeniului într-o succesiune de blocuri de rețea rectangulară, cilindrică sau sferică;
- o scrierea ecuației de proces, care trebuie să se rezolve numerică;
- o formularea condițiilor la limite;
- o aproximarea derivatelor în noduri cu diferențele finite centrale, respectiv progresive (sau înainte) sau regresive (sau înapoi);
- o rezolvarea sistemului de ecuații algebrice rezultate;
- o verificarea soluției obținute sau a modelului numeric obținut.

În cazul lucrării de față a fost abordată prevederea în exploatare a zăcământului , numit generic zăcământul **TEZA**, folosindu-se simulatorul **ECLIPSE** produs și comercializat de firma **SCHLUMBERGER**.

3.6.3. Rezultatele simulării

a) Injecția intraconturală

Se propune să se determine factorul de recuperare pentru schema de injecție : 4 sonde de injecție și 1 sondă de producție, folosind simulatorul ECLIPSE.

Zăcământul are caracteristicile și proprietățile prezentate la începutul capitolului.

Se consideră un zăcământ având forma unui cub de latură 200 m situat între adâncimile (500,505) m.

Acest zăcământ este propus pentru a fi exploatat printr-o schemă în 5 puncte, figura fig.3.28., care are următoarea componență:

- ✓ 4 sonde de injecție (P1_1, P2_1, P3_1, P4_1) și
- ✓ 1 sondă de producție (P0_1).

Adâncimea zăcământului este cuprinsă între aproximativ 500 și 505 (fig. 3. 28.), astfel zăcământul are forma unui cub de latură 200 m situat între adâncimile (500,505) m. Porozitatea are valoarea de 20% , permeabilitatea orizontală 417,6 mD și cea verticală 417,6 mD. În zăcământ, alături de țiței este prezentă și apa. Saturația interstițială este de 20%.

Pentru acest exemplu s-a considerat un grad ridicat de omogenitate al zăcământului. Zăcământul nu prezintă acvifer activ.

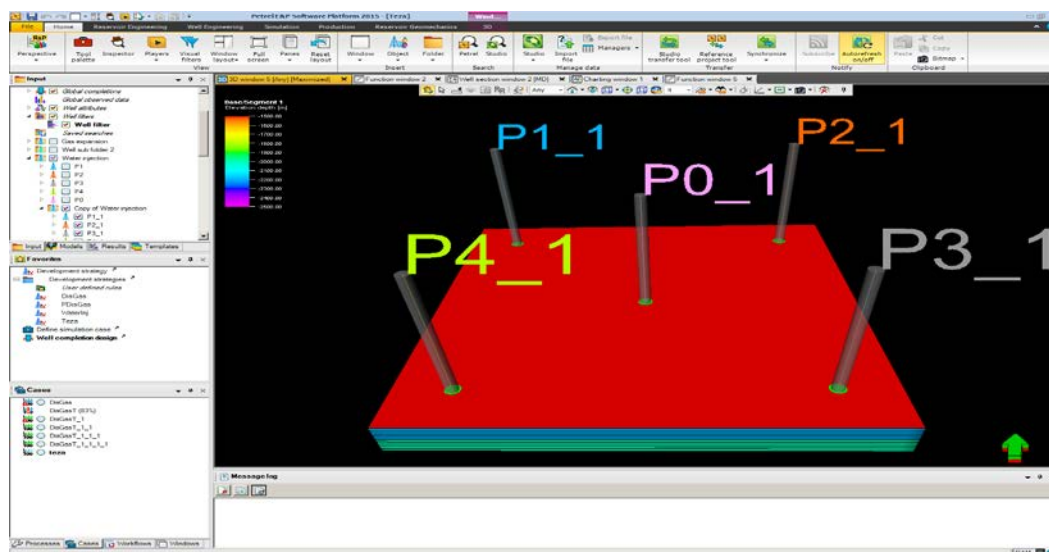


Fig. 3. 28. Schema zăcământului.

Durata exploatării este : 9 ani.

Presiunea limită de fund (P0_1): 10 bar.

P0_1 are limita pentru lichid de 40 sm³/d.

P1_1, P2_1, P3_1, P4_1 au limita de injecție de 28,54 sm³/d.

Potrivirea istoricului de producție al zăcământului (History Matching)

Validarea finală a modelului de simulare este dată de potrivirea istoricului de producție al modelului cu cel al zăcământului. Adică, se impun mărimi fizice măsurate, se calculează altele și se compară cu alte date măsurate sau cunoscute.

Printre mărimile fizice ale modelului de simulat care ar putea fi subiect de modificări, în vederea realizării cu succes a procesului de potrivire:

- ✓ porozitatea;
- ✓ permeabilitățile pe direcțiile orizontală și verticală.

Proiectarea exploatării zăcământului

Zăcământul de față reprezintă subiectul exploatării atât pentru injecția de apă intraconturală cât și pentru injecția de apă extraconturală. Exploatarea zăcământului a fost propusă a se realiza pe o durată de 9 ani.

Debitul pentru P0_1 are limita pentru lichid de 40 sm³/d. P1_1, P2_1, P3_1, P4_1 au limita de injecție de 28,54 sm³/d.

Presiunea limită de fund (P0_1): 10 bar. În zăcământ, alături de țiței este prezentă și apa. Saturația interstițială este de 20%.

În figurile fig. 3. 42.- 3. 30. sunt prezentate stările saturației în apă, țiței, respectiv gaze la momentul dinaintea exploatării pentru diferite secțiuni ale zăcământului considerat pentru simulare.

FIELD TOTALS									
NAME	VALUE	NAME	VALUE	NAME	VALUE	NAME	VALUE	NAME	VALUE
CURRENTLY IN PLACE	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600
ORIGINAL VOLUME	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52
ORIGINAL VOLUME	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52	PERMEABILITY	287.52

FIPNUM REGION AVERAGED GRID QUANTITIES									
REGION	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY
PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600
PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600

FIPNUM OIL RECOVERY FACTORS									
REGION	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY	PERMEABILITY
PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600
PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600	PERMEABILITY	417.600

Fig. 3. 44. Volumele de fluide din zăcământ rezultate în urma inițializării.

În urma inițializării, volumele de fluide din zăcământ rezultate sunt prezentate în raportul din figura 3. 44., astfel rezultând că gridul (rețeaua) are permeabilitatea 417,6 mD și porozitatea 20%.

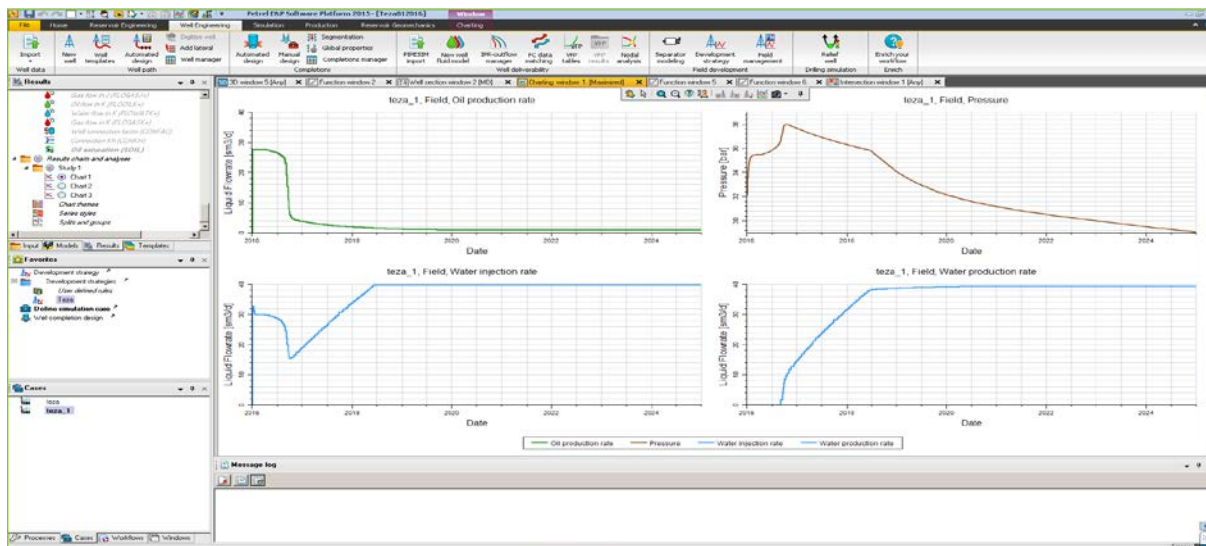


Fig. 3. 46. Comportarea zăcământului în exploatare.

Comportarea zăcământului în exploatare este evidențiată în figura fig. 3. 46., sunt date variațiile debitului precum și ale presiunii.

Presiunea crește până la valoarea maximă (40 bar), apoi scade până presiunea finală.

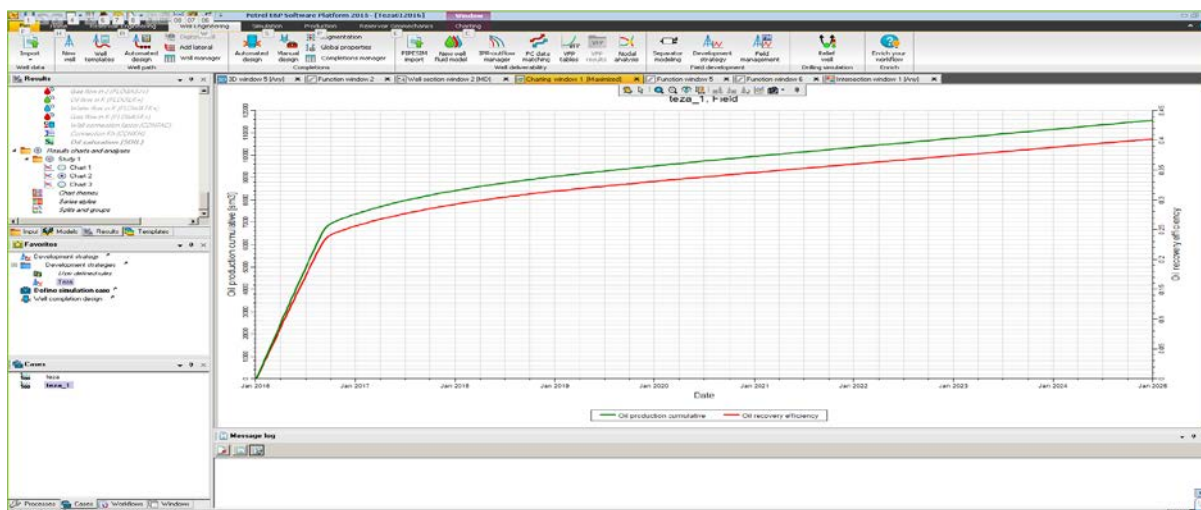


Fig. 3. 47. Variația în timp a factorului de recuperare și a cumulativului de țitei extras.

Variația în timp a factorului de recuperare a și cumulativului de țitei extras, este prezentată sub formă valorică în tabelul 3. 26.

Tabelul 3. 26. Variația în timp a factorului de recuperare și cumulativului de țitei extras, în cazul injecției intraconturale. (durata simulării : 01.01.2016-01.01.2025).

X	Y1	Y2
Data	Cumulativul de țitei extras [sm ³]	Factorul de recuperare
01/01/2016	0	0
01/01/2017	teza, câmpul	
01/01/2018	8441.269531	0.293592125
01/01/2019	9069.402344	0.315438926
01/01/2020	9542.927734	0.331908345
01/01/2021	9969.027344	0.346728355
01/01/2022	10377.81445	0.360946208
01/01/2023	10782.44336	0.375019431
01/01/2024	11185.38574	0.389034063
01/01/2025	11587.52246	0.403020501

Factorul final de recuperare la injecția intraconturală, în urma simulării realizate cu simulatorul ECLIPSE este de 40,3 %, iar după aplicarea modelului numeric este de 41,45%. Se observă ca sunt destul de apropiate, ceea ce demonstrează acuratețea calculelor efectuate.

b) Injecția extraconturală

Se determină factorul de recuperare pentru schema de injecție :

- o 3 sonde de injecție și
- o 8 sondă de producție, folosind simulatorul ECLIPSE.

Zăcământul are caracteristicile și proprietățile prezentate la începutul capitolului.

Se consideră un zăcământ având forma unui cub de latură 200 m situat între adâncimile (500, 505) m. Acest zăcământ este propus pentru a fi exploatat, schema acestui zăcământ fiind ca în figura 3. 49. Proprietățile zăcământului considerat (porozitatea și permeabilitatea) sunt prezentate în figurile fig. 3. 42 – fig.3. 44. Porozitatea este de 20% , permeabilitatea orizontală 417,6 mD și cea verticală 417,6 mD.

Adâncimea zăcământului este cuprinsă între aproximativ 500 și 505 (fig. 3. 40.). astfel zăcământul are forma unui cub de latură 200 m situat între adâncimile (500, 505) m.

În zăcământ, alături de țiței este prezentă și apa. Saturația interstițială este de 20%. Pentru acest exemplu s-a considerat un grad ridicat de omogenitate al zăcământului. Zăcământul nu prezintă acvifer activ.

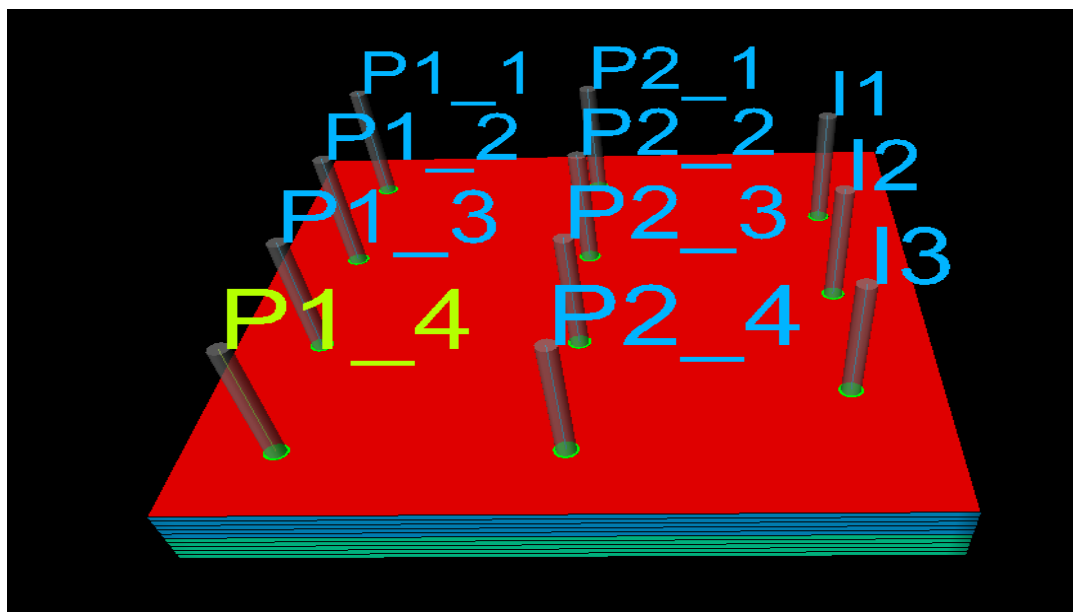


Fig. 3. 49. Schema zăcământului în formă de cub, care este propus pentru a fi exploatat printr-o schemă în 11 puncte.

Schema în 11 puncte (figura fig. 3. 49) este alcătuită din :

- 3 sonde de injecție (I 1, I 2, I 3) și
- 8 sondă de producție (P1_1, P1_2, P1_3, P1_4, P2_1, P2_2, P2_3, P2_4).

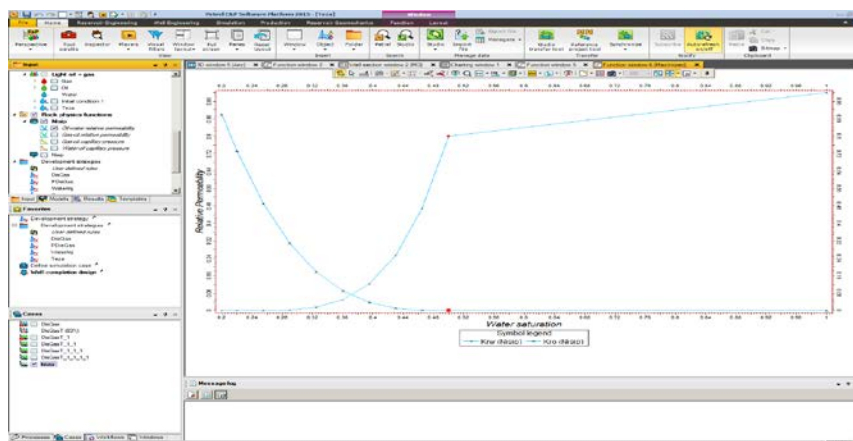


Fig. 3. 54. Curbele de permeabilități relative ale zăcământului considerat.

Din figura 3.54., care descrie variația permeabilităților relative în funcție de saturația gazului, rezultă că țițeiul este unul ușor.

Zăcământul este nesaturat, așadar nu există contact gaze țiței.

Durata exploatării este : 9 ani.

Inițializarea modelului începe cu modelarea saturației în apă a zăcământului considerat. Se continuă cu saturația în apă, în țiței, și respectiv în gaze la momentul de dinaintea exploatării, pentru o secțiune P1_2 Stânga-P2_2-I1.

În diagramele din figurile fig. 3. 61- 3. 62 se poate urmări evoluția stării de saturație la diferite momente (pași intermediari) din timpul exploatării.

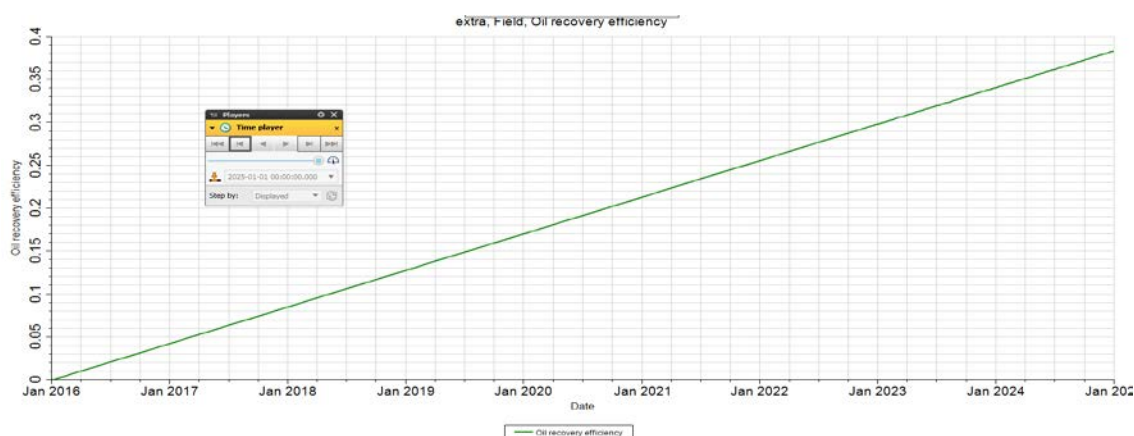


Fig. 3. 63. Variația în timp a factorului de recuperare.(01.01.2016 - 01.01.2025).

Se observă ca factorul de recuperare ajunge, în anul 2025, la valoarea 38,42%.

Tabelul 3. 27. Variația în timp a factorului de recuperare, în cazul injecției extraconturale.
(01.01.2016-01.01.2025).

extra, Field, Oil recovery efficiency	
X	Y1
Date	Oil recovery efficiency
	Oil recovery efficiency
01/01/2016	0
01/01/2017	0.042771883
01/01/2018	0.085426681
01/01/2019	0.12808162
01/01/2020	0.170736387
01/01/2021	0.213508114
01/01/2022	0.256163031
01/01/2023	0.298817903
01/01/2024	0.341472805
01/01/2025	0.384244442

Factorul de recuperare în urma simulării pentru cazul injecției extraconturale este de 38,42%, iar după aplicarea modelului numeric este de 39,45%. Se observă ca sunt destul de apropiate.



Fig. 3. 64. Variația în timp a factorului de recuperare, comparație între cazul injecției intraconturale și cel al injecției extraconturale.

Factorul de recuperare în urma efectuării simulării cu ajutorul simulatorul ECLIPSE, pentru cazul injecției intraconturală este 40,3%, iar pentru injecția extraconturală este de 38,42%.

În urma analizei efectuate au rezultat valorile:

- Factorul de recuperare injecție intraconturală : **41, 45%**
- Factorul de recuperare injecție extraconturală: **39,45%**
- Factorul de recuperare injecție intraconturală, **ECLIPSE: 40,3%**
- Factorul de recuperare injecție extraconturală, **ECLIPSE : 38,42%.**

Utilizarea simulatorului **ECLIPSE** pentru prevederea exploatării zăcământului considerat prin injecție de apă mi-a permis să ajung la concluziile:

- urmărind modificările saturațiilor în țiței, gaze și apă, pe parcursul efectuării simulării se observă o redistribuire a acestora ;

- în urma analizării rezultatelor obținute se constată că simularea prin injecție de apă cu simulatorul **ECLIPSE** ne arată o imagine apropiată de realitate.

Deosebirea dintre simulator și experimentul efectuat este dată de următorii factori:

- metoda de discretizare a zăcământului
- tipul de rețea cu care s-a discretizat zăcământul
- relațiile alese pentru prezentarea parametrilor folosiți la simularea efectuată (permeabilitățile relative, porozitatea, vâscozitatea, etc)
- corectitudinea datelor de intrare.

Referitor la rezultatele obținute cu simulatorul **ECLIPSE** trebuie avut în vedere că scopul simulărilor a fost acela de a compara rezultatele obținute cu ajutorul simulatorului și rezultatele calculelor efectuate, dacă se folosesc aceleași date de intrare.

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Injectia de apă este una din cele mai frecvent folosite metode de creștere a recuperării țițeiului. Ea este utilizată la menținerea presiunii de zăcământ și la dezlocuirea țițeiului către sondele de producție.

Injectia de apă este un proces complex care trebuie să țină cont de mai mulți factori care pot să facă din procesul de injecție un proces realizabil sau pot conduce la un insucces.

Cheia succesului unui proces de injecție de apă constă într-o bună caracterizare a zăcământului și o proiectare optimă a injecției de apă.

În această teză de doctorat sunt prezentate detaliat metodele de analiză și de prevedere a comportării zăcămintelor exploatate prin injectia de apă.

Spălarea cu apă va rămâne și pe viitor principala metodă de recuperare a țițeiului. Mai sunt multe teorii de dezvoltat, iar prin această teză de doctorat s-a încercat să fie un mic pas către o exploatare mai eficientă a țițeiului, într-o lume dependentă de această resursă.

Problema principală care se pune la exploatarea zăcămintelor prin injecție de apă, este de a se conduce procesul de injecție așa încât factorul de inundare, cât și cel de spălare, să aibă valori cât mai apropiate de unu.

Teoria Buckley - Leverett - Welge permite aprecierea eficacității spălării zonei inundate de către apă. Astfel, eficacitatea spălării depinde de proprietățile țițeiului și apei, mediului poros și de modul cum este condus procesul de injecție.

Teoria Craig - Geffen - Morse pune în evidență faptul că, factorul de inundare depinde de proprietățile fluidelor, mediului poros cât și de geometria rețelei de exploatare.

La scara distanțelor dintre sonde, date fiind condițiile de sedimentare, zăcămintele pot fi considerate, într-o oarecare măsură, uniforme. Pe verticală însă, neuniformitatea fiind mai accentuată, cele mai multe metode de prevedere o iau în considerare.

În teoria Dykstra - Parsons, ca în majoritatea metodelor, pentru ușurarea calculelor se face ipoteza simplificatoare că, pe ansamblu comportarea sistemului este dată de suma comportărilor unor strate uniforme separate continuu pe verticală în acel sistem. Se admite că sistemul studiat este compus din mai multe strate individuale uniforme, separate de bariere impermeabile fictive. Astfel a putut fi generalizată și metoda Craig - Geffen - Morse pentru un sistem neuniform pe verticală.

Ipoteza că, după inundarea unui strat, saturația medie în apă în zona inundată nu mai crește, nu conduce la mari erori, mai ales dacă stratul respectiv se blochează.

Teoria Dykstra - Parsons, permite evaluarea factorului de inundare pe verticală, ca fiind raportul între aria suprafeței inundate pe verticală și aria totală a secțiunii. Acest factor nu va depinde doar de permeabilitatea absolută ci și de raportul mobilităților.

Modelele prezentate se pot aplica pentru proiectarea exploatarei zăcămintelor noi, în ipoteza că injecția se face la bilanț și că se cunosc toate proprietățile mediului solid și fluid. Sunt multe cazuri în care proiectele de zăcământ executate, în special în faza inițială de exploatare, au condus la concluzii în neconcordanță cu comportarea ulterioară, din cauza necunoașterii realității din zăcământ.

Din modelul pentru zăcământul care a fost exploatat a rezultat un factor de recuperare final al țițeiului de 41,15% pe cale analitică, folosind modelul **BUCKLEY - LEVERETT ȘI WELGE**.

Din modelul pentru zăcământul care a fost exploatat a rezultat un factor de recuperare final al țițeiului de 40,3%, folosind modelul simulatorul **ECLIPSE**, în cazul injecției intraconturală și 38,42%, pentru injecția extraconturală.

În urma analizei efectuate au rezultat :

- Factorul de recuperare injecție intraconturală : **41, 45%**
- Factorul de recuperare injecție extraconturală: **39,45%**
- Factorul de recuperare injecție intraconturală, **ECLIPSE: 40,3%**
- Factorul de recuperare injecție extraconturală, **ECLIPSE :38,42%**
- Factorul de recuperare , metoda Dykstra – Parsons : **44,47%**

Pentru selectarea unui zăcământ „candidat” la stimularea prin injecția de apă trebuie analizați diferiți factori.

În scopul estimării factorului de recuperare prin injecția de apă s-au folosit, în această lucrare, metodele Buckley-Leverett sub forma propusă de Welge pentru injecția intraconturală, metoda Dykstra-Parson.

Studiile de caz privind estimarea evoluției factorului de recuperare asociate modelului Buckley –Leverett și Welge au permis punerea în evidență a detaliilor aferente acestor procese.

Particularitățile utilizării modelării numerice sunt reliefate de aplicarea simulatorului ECLIPSE în condiții specifice. Simularea s-a aplicat pe un zăcământ care este mărginit la nord și vest de o falie majorată generată de sare (falia sării).

Durata simulărilor este de 9 ani, din considerente de timpi de simulare. Procesele de acest tip pot fi simulate însă pe durate de timp mult mai mari.

Rezultatele numerice au fost comparate, în fiecare caz (cazul injecției intraconturale și cazul injecției extraconturale), cu cele obținute în urma simulării realizate cu ajutorul simulatorului ECLIPSE. Durata simularilor este de pe o perioadă de 9 ani.

Referitor la rezultatele obținute cu simulatorul **ECLIPSE** trebuie avut în vedere că scopul simulărilor a fost acela de a compara rezultatele obținute cu ajutorul simulatorului și rezultatele calculelor efectuate, dacă se folosesc aceleași date de intrare.

Principalele contribuții cu caracter personal se pot rezuma astfel:

- realizarea unor studii de caz privind estimarea factorului de recuperare al țițeiului din zăcământ prin injecție de apă, folosind diferite metode analitice, atât pentru injecția intraconturală, cât și pentru cea extraconturală.
- prezentarea sistematică a procedurilor de calculare a factorului de recuperare.
- elaborarea unei schemei logice pentru programul care calculează permeabilitățile relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata).
- elaborarea unui program în Visual Studio: C++ pentru calcularea permeabilităților relative ale apei, respectiv a țițeiului (utilizând formulele lui Corey), a fracției de apă (f_a), df_a/dS_a (derivata), care oferă posibilitatea utilizării calculatorului pentru determinarea acestor parametrii. În anexele 1, 2, 3 este redat codul sursă al programului denumit FRAPA. Programul prezentat în lucrare folosește date ușor accesibile, având în vedere un grad de exactitate ridicat, pentru o gamă variată de zăcămintele.
- stabilirea posibilității de estimare a performanței unui proces de recuperare a țițeiului din zăcământ prin aplicarea injecției de apă, cu particularizarea la condițiile specifice.
- perfectarea unui studiu de caz pentru injecția intraconturală, prin modelare numerică cu ajutorul simulatorului ECLIPSE.
- realizarea unui studiu de caz pentru injecția extraconturală, prin modelare numerică cu ajutorul simulatorului ECLIPSE.
- teza de doctorat **“Contribuții la îmbunătățirea modelelor numerice de simulare a injecției de apă”**, a scos în evidență posibilitatea măririi factorului de recuperare prin injecție de apă.

BIBLIOGRAFIE

1. **Ioachim, Gr., Popa, C., Gh.,** - "*Exploatarea zăcămintelor de țiței*", Editura Tehnică, București, 1979;
2. **Buckley, S.,E., Leverett, M.,C.,** - "*Trans. AÎME*"vol. 146, 1942;
3. **Cardwell, W., T.,** - "*The Meaning of the Triple Value in a Noncapillary Buckley - Leverelt Theory*", Trans. AIME vol. 216, pag. 71, 1959,
4. **Sheldon, W., J., Zondek, B., Cordwell, T., J.,** - "*One Dimensional Incompressible Noncapillary, Two-Phase Fluid Flow in a Porous Medium*", Trans. AIME vol. 216, pag. 290, 1952;
5. **Welge, H., I.,** - "*A simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive*", Trans. AIME vol. 159, 1952;
6. **Loyd, R., Kern.,** - "*Dysplacement Mechanism in Multi Well Sistem*", Trans. AIME vol. 195, pag. 39, 1952;
7. **Popa, C, Gh.,** - "*Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi fluide*", note de curs, U.P.G. Ploiești, 1996-1998;
8. **Vernescu, AI.,** - "*Mecanica zăcămintelor petrolifere*", Editura Tehnică, București, 1966;
9. **Dykstra, H., Parsons, R., L.,** - "*The Prediction of Oil Reovery by Water Flood*", Second Recovery of Oil in the United States, 2-d Edition, N.Y.,pag.l60, 1960;
10. **Codreanu, D., Ioachimciuc, R.,** - "*Dezlocuirea țițeiului de către apă în sisteme stratificate continuu (după apariția apei)*", Petrol și Gaze, nr.4/1968 1979, pag.208;
11. **.Craig, F., F., Geffen, T., M., Morse, R., A.,** - "*0/7 Recovery Performance of Pattern Gas or Water Injection Operations from Model Tests*", Trans. AIME vol. 204, 1955;
12. **Wasson, A., J., Schrider, A., Lee** - "*Predicting Waterflood Performance for Five Spot Patterns in StabilitiedReservoirs*", J.P.T., pag. 1195, 1968;
13. **.Popa, C., Gh.,** - "*Aplicarea metodelor moderne de soluționare a problemelor de inginerie de zăcământ*",Contract 211, I.P.G.G., București, 1971;
14. **.Higgins, R., V., Leighton, A.,J** - "*A Computer Method to Calculate Two-Phase Flow in Any Irregularly Bounded Porous Medium*", J.P.T., pag. 679, 1962;
15. **.Popa, C., Gh.,** - "*Dezlocuirea amestecului țiței-gaze de către apă într-un strat uniform*", Petrol și gaze., nr.3/ 1971;
16. **Higgins, R., V., Boley, D., W., Leighton, A., J.,** - "*Aids to Forecasting the Performance of Waterfloods* J.P.T., pag. 1076, 1964;

17. **Vernescu, Al.,** - "*Contribuții în problema perfecționării metodelor de prevedere a evoluției în exploatarea zăcămintelor petrolifere cu împingere completă de apă*", Teză de doctorat., București, 1971;
18. **Ioachim, Gr., Popa, C., Gh., Vernescu, Al., Popescu, D., M.,** - "*On the Numerical Simulation of Complete Water Drive Reservoirs*", 9-th World Petroleum Congress, P.D. 13, Tokio, 1975;
19. **Pârcălăbescu, I., D.,** - "*Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi*", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983;
20. **Chiran, P., Codreanu, D., Hauer, R., Giuclea, V., Cristea, N.,** - "*Noutăți asupra comportării zăcămintelor și principii generale de exploatare*", Curs de perfecționarea inginerilor din industria petrolului, vol. 1, ASIT - Ploiești, 1961;
21. **Soare, Al., Bratu, C.,** - "*Cercetarea hidrodinamică a zăcămintelor de hidrocarburi*", Editura Tehnică, București, 1987;
22. **Aziz, K., Settari, A.,** - "*Petroleum Reservoir Simulation*", Applied Science Publishers Ltd, London, 1979;
23. **Beca, C., Prodan, D.,** - „*Geologia zăcămintelor de petrol și gaze și geologie de santier*” - Editura Didactică și pedagogică, București 1983;
24. **Crichlow, H., B.,** – “*Modern Reservoir Engineering - a Simulation Approach*”, Prentice Hall, 1977;
25. **Dake, L.P.,** - “*Fundamentals of Reservoir Engineering*”, Elsevier Science RV Amsterdam (1978) 86; (seventeenth impression)
26. **Mattax, C., Dalton, R.L.,** - “*Reservoir Simulation*”, SPE, Richardson, Texas, 1990;
27. **Nistor, I.,** -, „*Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi*” - Editura Tehnică, București 1998;
28. **Nistor, I.,** -, „*Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi*”, Note de curs- IPG, An IV;
29. **Schlumberger - ECLIPSE 2012.1,** Reference Manual ;
30. **Schlumberger - ECLIPSE 2012.1,** Technical Description;
31. **Soare, Al., Pârcălăbescu, I., Popa, C., Gh.,** -, „*Ingineria zăcămintelor de hidrocarburi*”, volumul 2, Editura Tehnică, București 1981;
32. **Stoicescu, M.,** - "*Curs de Simulatoare Numerice*", Note de curs – MIZ, An I ;
33. <http://www.slb.com> ;
34. **Ionescu, M., E.,** - "*Curs de Metode IOR EOR*", note de curs-MIZ, An I;
35. http://www.infogazedesist.eu/istoric_industrie_petroliera.html;
36. www.intechopen.com;

37. **Thomas, G., W., Jagai, R., R.,** - *"Notes on Reservoir Simulation"*, Tulsa University, 1975;
38. **Badea, A.-M.**, - *"Imbunătățirea recuperării țițeiului pe structura Cărbunești, prin injecție intraconturală de apă"*, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești , 5 Noiembrie 2010;
39. **Badea, A. -M.**, - *"Design of a intracontural waterflooding process in a five points network, with a application for reservoir from Romania"*, CKS-CERDOCT, 2011Bucharest , 15-16 April 2011;
40. **Badea, A. -M.**, - *"Modele analitice de prevedere ale proceselor de exploatare prin injecție de apă"*–Raport de cercetare ,UPG, Ploiești 24.05.2012;
41. **Badea, A. -M.**, - *"Modele numerice de prevedere ale proceselor de exploatare prin injecție de apă"*–Raport de cercetare , UPG, Ploiești 23.10.2012;
42. **Badea, A. -M.**, - *"Comparație între modelul numeric și modelul analitic de prevedere ale proceselor de exploatare prin injecție de apă. Sudiu de caz. "*–Raport de cercetare , 30.09.2013 UPG, Ploiești 24.05.2012;
43. **Badea, A.-M.**, **Călărășu, C.**- *"Training and prevention possibilities of water coning"* – *Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No. 2/2016*;
44. **Dumitrache, L.,N., Suditu, S.,Nistor, I, Badea, A., M.**, *"Determining Water-Vapour Phase Equilibrium Coefficients at Different Temperatures"*, dat spre publicare - *Revista de Chimie*;
45. **Dumitrache, L.,N., Suditu, S.,Nistor, I, Badea, A., M.**, *Simulating salt precipitation in dry gas reservoirs using ECLIPSE Thermal CO2STORE"* –dat spre publicare- *Revista de Chimie*;
46. **Dumitrache, L.,N., Suditu, S.,Nistor, I, Badea, A., M.**, *"Using an Integrated Asset Model to Prove Feasibility of Installing a Field Compressor for Mature Dry Gas Reservoirs"* - *Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No. 3/2016*.
47. **Aboelhassan, M. G., Emam, M. S. , Noureldien Darhim M.**, *"Addressing Challenges of Water Flooding in Heavy oil Reservoirs Using Numerical Simulation: Case Study"*, Paper SPE 172880 , presented at the SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition held in Mangaf, Kuwait, 8-10 December, 2014;
48. **Alvarez, J.M., Sawatzky, R. P.**, -*"Waterflooding: Same Old, Same Old? "*, Paper SPE 165406, presented at the SPE Heavy Oil Conference Canada held in Calgary, Canada, 11-13 June 2013;
49. **Hashimoto, H, Kawamura, K, and Sueyoshi, M** (2013). *"Numerical Simulation Method for Damaged Ships under Flooding Condition"*, Proceedings of the 32nd International

- Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, OMAE, CD-ROM.
- Hashimoto, H, Le Touzé, D, Grenier, N, and Sueyoshi, M (2014);
50. **Noaman, A. F., El-Khatib, N.A.**, - *"The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir"*, Paper SPE 68076, presented at the 2001 SPE Middle East Oil Show held in Bahreain, 17-20 March 2001;
 51. **Wilhite, P. G.**, - *"Waterflooding"*, SPE Textbook Series, Vol. 3, Richardson, Tx 1986;
 52. **Dake , L. P.**, - *"Fundamentals of Reservoir Engineering"*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York City, 1978;
 53. **Kleppe, J.**, - *"Buckley – Leverett Analysis"*, TPG150, Reservoir Recovery Techniques, 2012;
 54. **El-Khatib, N.A.**, - *"The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir with Log-Normal Permeability Distribution"*, SPERE, dec. 1999;
 55. **El-Khatib, N.A.**, - *"The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir"*, Paper SPE 68076, presented at the 2001 SPE Middle East Oil Show held in Bahreain, 17-20 March 2001;
 56. **Ahmed, G., Castanier, L.M., Brigham, W.E.**, - *"An Experimental Study of Waterflooding from a Two- Dimensional Layered Sand Model"*, SPERE, feb.1988;
 57. **Beliveau, D.**, - *"Waterflooding Viscous Oil Reservoir"* , SPE Reservoir Evaluation &Engineering, Octomber 2009;
 58. **Mai, A., Kantzas, A.**, *"Heavy Oil Waterflooding: Effect of Flow Rate and Oil Viscosity"*, paper number 2007-144, presented at the Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, June 12-14, 2007;
 59. **Mai, A., Kantzas, A.** *"Improved Heavy Oil Recovery by Low Rate Waterflooding"*, paper number SPE/PS/CHOA 117648, presented at the SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Alberta, October 20-23, 2008;
 60. **Mai, A., Kantzas, A.**, *"Mechanisms of Heavy Oil Recovery by Low Rate Waterflooding"*, paper number 2008-156, presented at the Canadian International Petroleum Conference/ SPE Gas Tehnology Symposium, Calgary, Alberta, June 7-10, 2007;
 61. **Lager ,A., Webb, K., J., Black, C.J.J., Singleton, M.,&Sorbie, K. S.**, 2006, *"Low salinity oil recuvery – An experimental investigation. "*, Presented at the International Symposium of Core Analysi, Trondheim, Norway, 2006;
 62. **Green, D. W. & Willhite, G. P.**, *"Enhanced Oil Recovery. Richardson"*, Texas: Society of Petroleum Engineers, 1998;

63. **Kumer, M. , Hoang, V., Satik, C., Rojas, D.H.,** "*High –Mobility- Ratio Water Flood Performance Prediction : Challenges and New Insights*", SPE Res Eval &Eng (1): 186-196. SPE – 97671. doi: 10.2118/97671-PA, 2008;
64. **Lake, L. W.,** "*Enhanced Oil Recovery.*" SPE ATCE. Training Courses. Florence, Italy: Society of Petroleum Engineers, September 23, 2010;
65. **Lake, L. W .,** "*Enhanced Oil Recovery*", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989;
66. **Omekeh, A. V., Friis, H. A., Fjelde, I., Evje, S. ,**"*Modeling of Ion-Exchange and Solubility in Low Salinity Water Flooding*", Paper SPE 154144, presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, 14-18 April, Tulsa, Oklahoma, USA, 2012;
67. **Craft, B. C. & Hawkins, M. F.,**"*Applied Petroleum Reservoir Engineering (Second Edition)* ". NewYersey, ISBN0-13-039884-5:Prentice Hall PTR, 1991;
68. **Romero-Zerón, L.,** "*Introduction to Enhanced Oil Recovery (EOR) Processes and Bioremediation of Oil-Contaminated Sites*", © The Author(s).ISBN 978-953-51-0629-6, Published: May 23, 2012 under CC BY 3.0 license. © The Author(s);
69. **Satter, A., Iqbal, G. M., Buchwalter, J. L.,** „*Practical Enhanced Reservoir Engineering: Assisted with Simulated Software*”, Penn Well Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2007;
70. **Satter A., Iqbal, G. & Buchwalter, J.,**„*Practical Enhanced Reservoir Engineering.* Tulsa,Oklahoma: PennWell , 2008.
71. **Singhal, A. K.,** „*Role of Operating Practices on Performance of Waterfloods in Heavy Oil Reservoir*”, Journal of Canadian Petroleum Tehnology, March 2009;
72. **Smith, G. E.,** "*Waterflooding Heavy Oils*", paper SPE 24367, presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Casper, Wyoming, May, 18-21, 1992;
73. **Tang, G-O., Morrow, N.R.,** "*Salinity, Temperature, Oil Composition and Oil Recovery by Waterflooding*", SPERE 12(4):269-276. SPE- 36680-PA.DOI: 10.2118/36680-PA, 1997;
74. **Tompang, R., Kelkar , B.G.,** "*Prediction of Waterflooding Performance in Stratified Reservoir* ", paper SPE 17289 presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, March, 1988;
75. **Wade, J. E.,** "*Some Practical Aspects of Waterflooding*" , paper number 14230, presented at the 8th World Petroleum Congress, Moscow, June 13-18, 1992;
76. **Webb, K.J. , Black, C.J.J., and Edmonds, I.J.,** " *Low salinity oil recovery: The role of reservoir condition corefloods*", Paper C18 presented at the 13th EAGE Symposium on Improved Oil Recovery, Budapest, Hungary, 25-27 April, 2005.